XXIV 164/41
1936
Сер. 2
В 2.

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN d. UdSSR

ABHANDLUNGEN d. INSTITUTS FÜR GESCHICHTE
d. WISSENSCHAFT UND TECHNIK

SERIE II *HEFT 2*

A. A. RADZIG

GESCHICHTE DER WÄRMETECHNIK

VERLAG d. AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UdSSR
MOSKAU 1936 LENINGRAD

59
492
отказ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ИСТОРИИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ II *ВЫП. 2*

XXIV 164/41

А. А. РАДЦИГ

ИСТОРИЯ ТЕПЛОТЕХНИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1936 ЛЕНИНГРАД

Напечатано по распоряжению Академии Наук СССР

Непременный секретарь академик *В. П. Волгин*

Ноябрь 1935 г.

5871-40

Технический редактор А. А. Базанова Ученый корректор М. С. Пруссак

Сдано в набор 2/VII 1935 г. Подписано к печати 23/XII 1935 г.
Формат бум. 72×108 см. Печ. л. 26³/₄. 50 000 зн. в 1 печ. л. Тираж 5 000 экз.
Главлит В—31770. АНИ № 768. Заказ № 2270.

1-я Образцовая тип. Огиза РСФСР треста «Полиграфкнига». Москва, Валовая, 28.

сир. вес

5/0

КНИГА ИМЕЕТ

Листов печатных	Выпуск	В перепл. отд. соедин. №	Таблиц	Карт	Иллюстр.	Служебн. №№	№№ списка и порядковый	19
28		ср 2 62	1			М	262 81	7

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая эпоха характеризуется повышенным интересом к истории техники: возникли специальные общества, посвященные этой истории,— например, общество имени Ньюкомена в Англии и секция истории техники при Союзе немецких инженеров (VDI), — издаются специальные журналы (Beiträge zur Geschichte der Technik), общие технические журналы помещают охотно большие статьи, посвященные характеристике важных моментов в истории тех или иных областей техники. Так, в Англии большое количество работ вызвано было чествованием столетия со дня смерти Уатта, столетием открытия первой железной дороги с паровой тягой; столь же оживленно прошли там и чествования столетия со дня смерти Тревитика. В Германии появился ряд статей, посвященных памяти Отто и Лангена. Семидесятипятилетие журнала Общества немецких инженеров вызвало ряд статей обзорно-исторического характера; аналогичные обзорные статьи были напечатаны во французском журнале «Génie Civil» по случаю 50-летнего юбилея его издания. Наконец, появляется большое число сочинений разного рода, посвященных истории тех или иных областей техники.

Весь этот материал, относящийся к истории техники, крайне разнороден: тут есть и сборники оригинальных документов по тому или иному вопросу, биографии отдельных изобретателей и крупных деятелей промышленности, технические истории заводов, монографии, посвященные отдельным вопросам, обзоры развития различных отраслей техники и т. д.

Материал по истории техники, таким образом накопленный, неоднороден и в других отношениях: некоторым областям (например, паровой машине) очень посчастливилось, и по ним имеется огромная литература; другие области вызывали к себе меньшее внимание и относительно них нужна еще большая работа для пополнения чисто фактического знания. Кроме того, собранный материал часто совершенно не обработан и не освещен с точки зрения развития: процесс изменения излагается в порядке хронологии фактов, глубокие внутренние причины, скрытые противоречия данной эпохи, вызывающие те или иные изменения, не выясняются. Надо сказать, что для проведения такого углубленного анализа развития техники во многих вопросах нет достаточного материала; поэтому одна из главных задач современной истории техники есть собирание и критика основных материалов. Задача эта особенно ясна и определенна, поскольку

цело касается развития техники в России: здесь серьезное изучение первоначальных материалов, можно сказать, только начинается и составляет одну из важнейших задач Института истории науки и техники Академии Наук СССР.

С другой стороны, в настоящее время имеется, конечно, потребность в освещении процесса развития крупных областей техники, хотя бы основанном на уже собранных неполных материалах. При современных требованиях к документации исследования, к пользованию, по мере возможности, первоисточниками, задача эта не очень благодарна, так как всякая история крупного отдела не может опираться только на первоначальный материал, собранный автором, а всегда поневоле пользуется в той или иной степени материалом уже обработанным. Некоторые спорные вопросы при этом вообще не могут быть решены с полной обоснованностью.

Все сказанное относится в полной мере и к предмету настоящего сочинения — истории теплотехники.

Теплотехника, составляющая до сих пор важнейшую часть энергетики первичных двигателей, является областью, история которой представляет большой интерес. Но, с другой стороны, эта область обширна и разработана она в литературе весьма неравномерно. Первоисточники (вроде материала, имеющегося на заводах и в очень специальных заграничных изданиях) в значительной степени недоступны; поэтому предлагаемая работа невольно будет носить характер монографии, основанной на литературных данных. Первоисточники здесь будут, так сказать, «второго порядка»: сочинения и журналы того времени, к которому относится исследование, или эпохи близкой к изучаемой, документы, опубликованные в других сочинениях и т. п.

Что касается содержания настоящего сочинения, то оно обнимает чисто энергетические области теплотехники: историю развития паровых машин, паровых котлов, паровых турбин и двигателей внутреннего сгорания. Что касается других аппаратов для получения или использования тепла: печей, теплообменных аппаратов, то развитие их тесно связано с соответствующими областями промышленности: металлургией, технологией металлов, химической технологией. Поэтому история развития этих устройств естественно находит свое место в очерках истории развития указанных областей.

Воздуходувные машины, в которых происходят тоже явления теплового характера, по существу своему имеют аналогию с водяными насосами; их развитие может быть изложено удобнее в связи с развитием насосов, как это и сделано в новейшей книге Весткотта (Westcott. Pumping Machinery, Part I. Historical Notes. London, 1932). Наконец, историю холодильного дела лучше всего было бы сделать предметом специальной монографии.

В отраслях техники, пользующихся в широких размерах достижениями теплотехники, нас интересовали, главным образом, последние; характеристика же развития самих отраслей не входила в нашу задачу. Так,

в области водного транспорта нас интересовало развитие судовых машин и котлов, а не судостроения вообще; в области железнодорожного транспорта мы говорим только о создании и развитии паровоза, как тепловой машины, а не железных дорог и т. д.

В настоящем сочинении автору-технику естественно было уделять преимущественное внимание проблемам собственно технического порядка; однако, там, где это возможно, он пытался показать зависимость развития данной отрасли техники от общих социально-экономических моментов.

Порядок изложения принят у нас хронологический: история теплотехники разделена на четыре больших периода: первый обнимает самые ранние попытки создания тепловых двигателей, но главным образом касается развития теплотехники в XVII и XVIII вв. Второй период заключает в себе первую половину XIX столетия. Третий начинается со второй половины XIX столетия и доходит до эпохи мировой войны, и наконец, четвертый период обнимает послевоенное развитие теплотехники. Конечно, вполне строго провести хронологическую последовательность в расположении материла было невозможно: так, создание термодинамики нами отнесено к третьему периоду, хотя первые термодинамические работы С. Карно, Р. Майера, Джоуля и даже Г. Гельмгольтца появились раньше. Точно так же история газовых двигателей и паровых турбин включена в третий период, хотя самые ранние попытки устройства двигателей внутреннего сгорания относятся к XVII столетию, а Геронов шар, являющийся прототипом реактивной турбины, был создан даже за сто лет до начала нашей эры.

Для соблюдения логической последовательности такие отступления приходилось делать и в других местах.

Исследование наше начинается с характеристики производственных и технических проблем XVII и начала XVIII вв. Эта характеристика необходима для уяснения направления, в котором шли первые попытки создания паровых двигателей в XVII и начале XVIII вв. Труды этих первых изобретателей привлекали особое внимание ранних историков паровой машины и вызывали часто страстную полемику по вопросу о «первом» изобретателе паровой машины. Эта точка зрения уже давно оставлена даже буржуазными историками. [1] Маркс совершенно правильно указывает, что невозможность связать изобретение с определенным именем относится и ко всем изобретениям XVIII в. [2] История теплотехники показывает, что даже позднейшие крупные изобретения в области двигателей и их приложений (паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, пароходы, паровозы) не могут быть приписаны одному лицу, а являются

[1] Например, C. Matschoss. Die Entwicklung der Dampfmaschine, т. I, стр. 281. Та же мысль высказывается Смайльсом («Биографии промышленных деятелей», стр. 146—160). Последний приводит между прочим мнение Роберта Стефенсона (сына «изобретателя» паровоза): нельзя приписывать изобретение паровоза одному лицу, оно «создано целым поколением механиков и инженеров».

[2] «Критическая история технологии вообще показала бы, как мало любое из изобретений XVIII столетия принадлежит одному лицу». К. Маркс. Капитал, т. I, стр. 256.

результатом усилий многих изобретателей, часто принадлежащих к ряду поколений.

История раннего развития паротехники является наилучше изученной. Марксом выяснена также связь этих изобретений (особенно — машины Уатта) с экономической жизнью того периода и определена завершающая роль машины Уатта в истории промышленного переворота.

История паротехники первой половины XIX в. заключается, главным образом, в изложении разного рода видоизменений в типе паровых машин, созданном Уаттом (машины более высокого давления, усовершенствованные пораспределения и регулирования, машины двойного расширения). В нее входит также описание развития специальных типов паровых машин: машин пароходных, паровозных, прокатных, паровых молотов, паровых насосов, машин воздуходувных и подъемных.

Конец 40-х годов и начало 50-х годов XIX столетия (период, с которого начинается новый отдел предлагаемого труда) характеризуется двумя крупными явлениями: созданием в Америке нового типа машин Корлисса и началом планомерного опытного изучения действия паровой машины. Это изучение сделалось возможным благодаря созданным к тому же времени основам термодинамики и точному изучению свойств водяного пара, произведенному в особенности Реньо. Широко поставленные опыты над паровыми машинами производятся одновременно в Англии (Кларк), Соединенных Штатах (Ишервуд) и Франции (Гирн). Особенное значение имели опыты последнего, приведшие к установлению так называемой «экспериментальной» теории паровой машины. Эта теория выяснила значение таких условий работы паровой машины, как применение паровой рубашки, перегретого пара, расширения во многих цилиндрах. Эти усовершенствования определили в сущности весь дальнейший прогресс паровой машины в термодинамическом отношении. Особого рассмотрения потребовало введение в широких размерах клапанных пораспределений (Броун — 1867 г., Зульцер — 1873 г.).

Вторая половина 80-х годов и начало 90-х годов характеризуются уже растущим влиянием электротехники: для обслуживания возникающих электрических станций понадобились машины гораздо более мощные, более экономичные и лучше регулируемые, чем применявшиеся до того времени.

Поэтому последнее десятилетие XIX в. является периодом самого блестящего развития паровых машин, которое, однако, все же не могло устранить всех противоречий между конструкцией паровых машин и требованиями электротехники. Эти противоречия были отчасти устранены паровой турбиной, развитию которой посвящен особый отдел настоящей книги. Развитие паровых двигателей сопровождалось изменением требований к паровым котлам; процесс развития последних рассматривается параллельно с процессом развития паровых машин.

Рассмотрение истории теплотехники в XIX в. заканчивается главами, посвященными возникновению и развитию двигателей внутреннего

сгорания. Возникновение этих двигателей было, главным образом, обязано стремлению дать двигатель, доступный мелкой промышленности, для которой мало годились установки с паровыми машинами. Долгое время двигатель этот сохранял характер мелкого двигателя и только к концу 90-х годов, с применением газов доменных печей, двигатели внутреннего сгорания стали обслуживать крупную промышленность. Двигатель Дизеля, появившийся в конце 90-х годов, прошел ту же эволюцию, но только гораздо быстрее. Настоящее развитие двигателя Дизеля, как и паровых турбин, относится уже к XX в. История развития двигателей Дизеля, паровых турбин и паровых котлов составляет содержание глав, посвященных XX в. В указанных главах могли быть отмечены только основные тенденции в развитии соответствующих областей теплотехники, так как материал по этим отделам слишком обширен и изложение его дается в специальных сочинениях.

Таково вкратце содержание книги. Являясь одним из первых опытов на русском языке исторического обзора крупной области техники, книга эта, несомненно, заключает ряд недостатков, относящихся как к существу излагаемого материала, так и к методологии исследования. Выяснение этих недостатков (желательное и полезное для автора настоящей книги) может принести и общую пользу, содействуя созданию общих норм для разработки сочинений по истории техники.

Рукопись настоящей книги была тщательно просмотрена П. П. Забаринским, внесшим в нее ряд чрезвычайно ценных исправлений и дополнений. Большое содействие в наведении литературных справок и собирании материалов для книги оказали также и другие сотрудники Института истории науки и техники, а также библиотекари Ленинградского индустриального института Л. А. Матвеева, Е. С. Мальметрем и М. Т. Ренне. Всем этим лицам я позволяю себе выразить здесь свою благодарность.

Проф. А. Радциг

ПЕРВЫЙ ПЕРИОД

ПРОБЛЕМА ТЕПЛОТЕХНИКИ

В XVII И XVIII СТОЛЕТИЯХ

Глава I

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В XVII И НАЧАЛЕ XVIII СТОЛЕТИЙ

Текстильная промышленность в Англии в XVII веке

Чтобы понять ход развития паровой машины в XVII и в начале XVIII вв., необходимо познакомиться с общим состоянием техники в этом периоде в областях, которые были связаны с позднейшими проблемами теплотехники. При этом можно преимущественно говорить об Англии, так как изобретения XVII и XVIII вв. в области паротехники сделаны были главным образом в Англии и связаны с нуждами промышленности в этой стране.

Крупную роль в хозяйственной жизни Англии в XVII в. играла шерстяная промышленность; благодаря хорошим пастбищам и развитию овцеводства, Англия с давних времен была страной, производящей большое количество шерстяных тканей, которые не только удовлетворяли потребности внутри страны, но и являлись важнейшим предметом вывоза. До половины XVIII столетия эта промышленность представляла собой главную промышленность Англии. Однако, производство шерстяных материй, крупное по общему количеству вырабатываемых товаров, было распределено среди большого числа мелких кустарей и носило в общем характер ручного домашнего производства. Только некоторые операции, например, валяние и ворсование сукна, делались на механизированных предприятиях: для этой цели служили небольшие водяные мельницы, куда окрестные ткачи возили куски своего сукна. Элементы капитализма проникали в шерстяную промышленность прежде всего в лице скупщиков сукна, производимого на дому. Позже эти скупщики, на ряду с продолжением операций по скупке сукна, начинают основывать собственные небольшие мастерские с 10—12 станками (вместо 3—4 у кустаря-производителя).

Производство хлопчатобумажных тканей (сыгравшее крупную и даже решающую роль в промышленном перевороте в Англии во второй половине XVIII в.) в XVII в. было только в зародыше: в Англию ввозились готовые хлопчатобумажные материи из Индии. Небольшое количество импортного хлопка около середины XVII столетия начали перерабатывать в Англии тоже кустарным образом. Но производство это

в рассматриваемую эпоху не приобрело большого значения и вызывало сильное неудовольствие со стороны ремесленников и предпринимателей, занятых в шерстяной промышленности. Последние добились в 1700 г. в парламенте акта, запрещающего ввоз хлопчатобумажных изделий из Индии, Персии и Китая, а в 1719 г. — полного запрещения продавать или покупать эти ткани, носить или хранить их у себя.

Таким образом, вся текстильная промышленность вообще в XVII в. стояла на невысоком уровне техники и не предъявляла каких-либо особых требований к получению двигательной силы, вполне обходясь силой животных и воды.

Машины для получения силы от движения животных были к тому времени хорошо разработаны. Они описаны, например, в известном сочинении Леупольда, вышедшем в начале XVIII в.[1] Применялись они, конечно, не только в текстильной, но и в других отраслях промышленности, тоже не носивших характера крупного производства.

Железоделательная и каменноугольная промышленность

Другой отраслью промышленности, тоже сыгравшей большую роль в позднейшем развитии паротехники, была металлургия (особенно металлургия железа) и, вообще, горное дело.

Добывание чугуна из руд в небольших доменных печах и переработка его в ковкое железо и сталь при помощи кричного способа, а также изготовление металлических изделий, с древних времен были распространены в Англии.

При этом самая добыча руд производилась во многих ее районах.

Для всех металлургических операций применялся древесный уголь, и это повлекло за собой крайне быстрое уничтожение лесов. Но леса составляли крупную часть национального богатства Англии, так как были необходимы прежде всего как источник основного материала для судостроения—судового леса. Поэтому уже в начале XVII столетия начинаются нападки на железоделательную промышленность как вредную для интересов судостроения. Действительно, при тогдашнем состоянии металлургической техники, потребность в дровах была чрезвычайно велика: для получения одной тонны железа в брусках необходимо было сжечь около 40 м³ дров, для выделки же одной тонны полосового железа нужно было 70 м³ дров. Операции, требовавшие затраты механической энергии (ковка и раздувание мехов), производились обыкновенно посредством водяных колес или (для горнов малых размеров) лошадиных приводов. Истребление лесов шло так быстро, что вызвало ряд правительственных мер для ограничения производства железа. Под влиянием этих обстоятельств, к концу XVII столетия добыча железа в Англии стала сильнейшим образом сокращаться. Железо приходилось ввозить из-за границы (из Швеции, Испании и Германии, а позже — из России). Необходимость ввоза этого важного

[1] Leupold. Theatrum Machinarum, стр. 266 и след. Leipzig, 1724 г. Они описаны также в более ранних сочинениях по гидравлическим двигателям, о которых мы говорим дальше.

материала из-за границы вызывала большие опасения и с точки зрения государственной обороны; затруднения с получением железа обусловили также большие трудности в металлообрабатывающей промышленности (которая достигла высокого развития в Шеффильде, Бирмингаме и других городах). Острая потребность в железе вызвала деятельность ряда изобретателей, предлагавших прежде всего замену в доменном производстве древесного угля каменным.

Каменный уголь добывался в Англии тоже с давнего времени. Сведения о нем встречаются еще в англо-саксонской хронике 852 г. Но в течение многих веков он применялся почти исключительно для отопления домов и для некоторых промышленных операций (на стеклянных и кирпичных заводах, в пивоваренных, винокуренных и т. п. предприятиях). Каменный уголь применялся также при обработке металлов, но только при ковке. Применение же каменного угля в доменном процессе вызывало большие технические затруднения: серные соединения, находящиеся в каменном угле, переходили в железо и чрезвычайно ухудшали его качество; были и другие затруднения для применения каменного угля при добывании железа, например, свойство каменного угля спекаться. Поэтому только острота положения с добычей железа из руд вызвала ряд предложений о применении каменного угля для этой цели, которые тянутся через все XVII столетие; мы встречаем ряд попыток в этом направлении: Симона Стертеванта (1612 г.), Дода Додлея, первые опыты которого были сделаны в 1619 г.; всю позднейшую долгую жизнь, полную политической борьбы, [1] он в значительной степени посвятил осуществлению своего изобретения. Но, отчасти в связи с неуспехом в политической деятельности, отчасти вследствие недостаточной разработки его изобретения, предложения Додлея успеха не имели. Подробностей о техническом выполнении предложенного Додлеем процесса выплавки чугуна из железной руды при помощи каменного угля до нас не дошло; повидимому, он применял не просто каменный уголь, а сначала перерабатывал его в кокс.

Последняя в XVII в. попытка применения каменного угля к получению железа принадлежит немцу Блауенштейну (по-английски Блустон), построившему для этой цели в 1667 г. специальную доменную печь; он применял не кокс, а каменный уголь, и это повлекло за собой неудачу его способа. На этом кончились попытки XVII в. над применением каменного угля к выплавке чугуна из руд. Они не привели к увеличению спроса на каменный уголь и на железо. Копи железные были неглубоки и немногочисленны, угольные копи — тоже (до 15 фут. —4,5 м) и только в медных копях в Корнваллисе глубина была значительно больше (доходила до 400 фут.). При этих условиях металлургическая промышленность предъявляла спрос только на насосы для откачивания воды, преимущественно с небольшой глубины.

[1] В эпоху Кромвеля он был сторонником Карла I и принимал деятельное участие в гражданской войне, поведшей к гибели этого короля. История жизни Додлея и его участия в борьбе за короля подробно рассказана у Смайльса в «Биографии промышленных деятелей», гл. III, СПб., 1903.

Гидравлические сооружения

Третьей областью, создавшей спрос на машинное оборудование, была гидравлика вообще и в частности — водоподъемные сооружения разного рода. Эта отрасль техники была притом развита не только в Англии, но и во Франции, в Италии и в Германии. Первые крупные гидротехнические сооружения получили развитие именно в Италии в XVI в.

Во Франции постройка каналов особенно развивалась в царствование Людовика XIV; так, при Кольбере итальянским инженером Андреоси был составлен и частью осуществлен широкий план развития и расширения системы каналов во Франции: Лангедокский канал должен был соединить Атлантический океан с Средиземным морем, кроме того предполагалось расширение и углубление Сены, с одной стороны, для связи Парижа с океаном через Гавр, с другой стороны, Париж через Марну и систему каналов связывался с Рейном и Шельдою. Кроме каналов во Франции строились огромные водопроводные сооружения, из которых самое знаменитое — водоподъемная станция в Марли, построенная для снабжения водой версальских фонтанов. Эта установка является совершенно исключительной по тогдашнему масштабу, и она очень характерна как иллюстрация состояния тогдашней техники гидравлических двигателей и водяных насосов. Эта установка вызывала справедливое удивление современников и, вместе с прочими «чудесами» Версаля, имела целью вызвать именно впечатление несравненного могущества французского короля. Устройство это, построенное около 1682 г. под руководством «кавалера» Арнольда де-Вилля (de Villes), а фактически исполненное мастером из Льежа Реннекеном Салемом (Rennequin Salem, 1645—1708), должно было подавать воду из Сены на высоту 162 м над уровнем реки, а оттуда направлять в громадные резервуары Марли и Лувсекенна, находящиеся на 37 м над уровнем Версаля. [1]

Количество подаваемой воды менялось с годами и сильно упало с ухудшением состояния установки в XVIII в. Для первых лет работы установки (1685—1718 гг.) можно принять средний расход в 3 200 м³ в сутки; максимальный расход мог доходить до 5 000 м³ в сутки. Длина линии подачи составляла около 1 300 м. Насосы располагались в 3 ряда, один над другим. Теоретическая мощность установки при максимальном расходе будет

$$\frac{5000 \cdot 1000 \cdot 162}{24 \cdot 3600 \cdot 75} = 125 \text{ л. с.}$$

Для получения этой, по современному масштабу, ничтожной мощности понадобилась установка в Сене 14 нижне-подливных колес, каждое по 12 м в диаметре. Эти 14 колес приводили в действие непосредственно

[1] Описания устройства Марли имеются во многих сочинениях XVII в. (у Леупольда, Белидора), но особенно подробное описание дано в статьях Л. А. Барбе (L. A. Barbet) Eaux de Versailles (Revue de mécanique, январь, март, май, июнь, сентябрь, октябрь 1906 г.). В этой статье изложена и вся дальнейшая история переустройства версальского водоснабжения до новейшего времени.

64 насоса первого подъема (на высоту 48 м 45 см); при помощи кривошипов, шатунов и качающихся треугольников эти же колеса приводили в движение 49 насосов второго подъема (на высоту дальнейших 50 м 53 см) для подачи воды в особый бассейн; сюда же подавали воду еще другие 30 насосов; наконец, 78 насосов подымали воду на последний подъем (57 м 17 см). Таким образом имелся всего 221 насос; все насосы приводились в движение от тех же колес при помощи шатунов, кривошипов, качающихся рычагов и т. п. органов (48 цапф, кривошипов и шатунов, 1 122 больших деревянных балансира и 2 108 деревянных тяг, каждая на 1,95 м длины).

Общая стоимость всего сооружения с машинами достигала суммы около 40 000 000 руб. Все эти данные характеризуют, с одной стороны, большие требования, предъявлявшиеся в XVII в. к насосам, а с другой — трудность (а во многих случаях даже невозможность) удовлетворения этих требований помощью гидравлических двигателей.

Из нашего общего обзора следует, что очередной технической задачей XVII в. являлось усовершенствование именно насосных сооружений. В эту сторону были направлены и теоретические работы Торричелли (1673 г.), Паскаля (1648 г.) и Отто фон Герике (1654 г.), показавшие значение давления воздуха и выяснившие невозможность устройства всасывания на высоту, превышавшую 10 м.

Прикладная механика XVII и первой половины XVIII вв. сводилась, главным образом, к гидравлике. Отсюда — название знаменитого в свое время сочинения Белидора «Гидравлическая архитектура». [1]

Естественно, что в сторону разрешения вопроса о подъеме воды были направлены усилия изобретателей паровых двигателей XVII и первой половины XVIII вв. Лишь во вторую очередь и весьма несовершенно (при помощи передачи через гидравлический двигатель) поставлен был вопрос о применении пара для приведения в движение фабрик. [2]

В следующей главе мы перейдем к обзору этих первых попыток применения силы пара к подъему воды.

---

[1] Belidor, Architecture hydraulique, изд. 1-е, Paris, 1737—1739 гг. Затем эта книга несколько раз переиздавалась, в последний раз ее совершенно переработал и снабдил большими дополнениями Навье (в 1817 г.).

[2] Именно этот характер очередной задачи техники сознавался и самими изобретателями. Так, Д. Папин в своей большой работе (Papin, Traité de plusieurs nouvelles machines, Paris, 1698) описание предлагаемого им парового устройства озаглавливает: «Исследование, касающееся способа откачивать воду из копей без затраты большого труда даже в том случае, если реки являются слишком удаленными для того, чтобы их к этому применить». (Lettre touchant la manière de tirer l'eau des mines avec peu de peine quand même les rivières sont trop éloignées pour y servir). Другой изобретатель, Сэвери называет свою книгу, посвященную описанию его паровой машины, «Друг рудокопа» («The miner's friend»). Белидор в своем сочинении (M. Belidor. Dictionnaire portatif de l'ingénieur et de l'artilleur, nouvelle édition, Paris, 1768) определяет паровую машину именно как особого рода насос (machine à feu: c'est une sorte de pompe, qui agit par la force du feu et qui élève l'eau à une hauteur considérable).

Глава II

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРА В XVII СТОЛЕТИИ

Сведения о самых ранних попытках использования силы пара

В первых сочинениях по паровым машинам всегда помещались краткие сведения и по истории паровой машины. Вскоре стали появляться и книги, специально посвященные истории паровой машины.

Не говоря о сочинениях изобретателей первых паровых аппаратов (о которых будет сказано специально дальше), самые ранние сведения о паровых машинах находим в вышеупомянутых книгах Леупольда [1] и Белидора.[2]

Более же обстоятельные сведения (в связи с самостоятельными расчетами) появились впервые значительно позже, именно в книге Прони. [3] Начиная с двадцатых годов прошлого столетия выходит ряд отдельных сочинений, посвященных паровым машинам и их истории. Особенной известностью пользуются сочинения Ферэ, [4] Тредгольда, [5] Гашетта, [6] Араго, [7] Стюарта, [8] Галловея. [9]

---

[1] Leupold, Theatrum Machinarum Generale (1-й том сочинения Леупольда), гл. XIX, Leipzig, 1724. Leupold, Theatri Machinarum Hydraulicarum, t. II (2-й том сочинения Леупольда), стр. 87 и след., Leipzig, 1725.

[2] M. Belidor, Architecture hydraulique, t. V, ch. III, Paris, 1739. «Des machines pour tirer l'eau des puits fort profonds, principalement de celles, qui sont mûes par la force du feu».

[3] R. Prony, Nouvelle architecture hydraulique, seconde partie, Paris, 1796.

[4] Farey, Treatise on the steam engine, London, 1827.

[5] Tredgold, Principles of the steam engine, London, 1827. Мы цитируем это сочинение по французскому переводу, сделанному с большими исправлениями и дополнениями Мелле: Th. Tredgold. Traité des machines à vapeur avec des notes et additions par F. N. Mellet, Bruxelles, 1838.

[6] Hachette, Histoire des machines à vapeur, Paris, 1830. Это небольшое, но очень ценное сочинение заключает много важных для истории паровой машины выдержек из разных сочинений по паровым машинам (XVI, XVII и XVIII ст.).

[7] F. Arago, Notice historique sur les machines à vapeur, Oeuvres, t. V, Paris, б. г. 1-е изд. было напечатано в журнале «Annuaire du bureau des longitudes», 1829.

[8] Stuart, A descriptive history of the steam engine. London, 1824. Stuart, Anecdotes of the steam engine, London, 1829.

[9] Galloway, History of the steam engine, London, 1836.

Из русских сочинений той же эпохи следует упомянуть об очень удовлетворительно составленном (с использованием многих источников) сочинении Божерянова.[1]

Сочинения новейшего времени делаются весьма многочисленными и можно указать только на главные (притом касающиеся специально истории паровой машины вообще): Рело,[2] Тэрстон,[3] Матчосс,[4] А. А. Брандт.[5]

Как мы уже говорили в предисловии, во многих из этих старых историй паровой машины стремление авторов направлено на проведение предвзятой идеи о нахождении одного специального «изобретателя» паровой машины из числа соотечественников автора, чтобы приписать «честь» изобретения паровой машины своей стране. Иногда при этом делаются большие натяжки, и материалом, сообщаемым такими историками, приходится пользоваться очень осторожно.[6] Хорошие новейшие истории свободны от этого недостатка.

Наиболее древнее указание о применении силы пара относится к Архимеду (родился в 287 г. до нашей эры), которому приписывается изобретение пушки, действовавшей водяным паром, названной «Архитронито».[7]

Эта пушка и ее устройство описаны у Леонардо-да-Винчи, который и ссылается на Архимеда. Вопреки мнению Матчосса, склонного признать, что речь здесь идет о подлинном Архимеде, крупнейший знаток античности Г. Дильс не без основания утверждает, что в действительности это изобретение относится к гораздо более позднему периоду. Впрочем и Дильс допускает древне-греческое происхождение идеи паровой пушки.[8]

Следующим по времени является изобретение Герона Александрийского (первое столетие до нашей эры). Ему принадлежит изобретение «Эолипила» — шара, вращающегося вследствие реактивного действия истекающего пара. Эолипил является прототипом паровой турбины,

---

[1] Божерянов, И. Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин, СПб, 1842.

[2] F. Reuleaux, Kurzgefasste Geschichte der Dampfmaschine, Braunschweig, 1891.

[3] Мы пользовались немецким переводом: R. H. Thurston, Die Dampfmaschine. Geschichte ihrer Entwicklung, Leipzig, 1880.

[4] C. Matschoss, Geschichte der Dampfmaschine, Berlin, 1901. Matschoss, Entwicklung der Dampfmaschine, Berlin, 1908 (наиболее крупное и серьезное сочинение. Книга Матчосса 1901 г. является как бы подготовительным сочинением к книге 1908 г.).

[5] Брандт, А. А. Очерк истории паровой машины и паровых двигателей в России, СПб, 1892.

[6] На такие «националистические» тенденции в истории паровой машины жалуется уже Божерянов (цит. соч., стр. 19). См. также полемику Араго с английскими авторами (цит. соч., гл. I и VII).

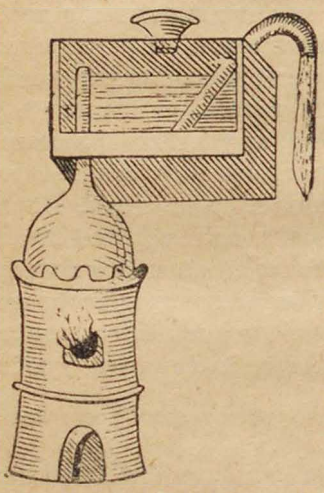
[7] Название это можно перевести как «самый сильный гром». Упоминание об этом приборе имеется у Леонардо-да-Винчи.

[8] См. интересную работу Дильса «Античная техника», перевод с немецкого, стр. 103—106, Гостехиздат, 1934.

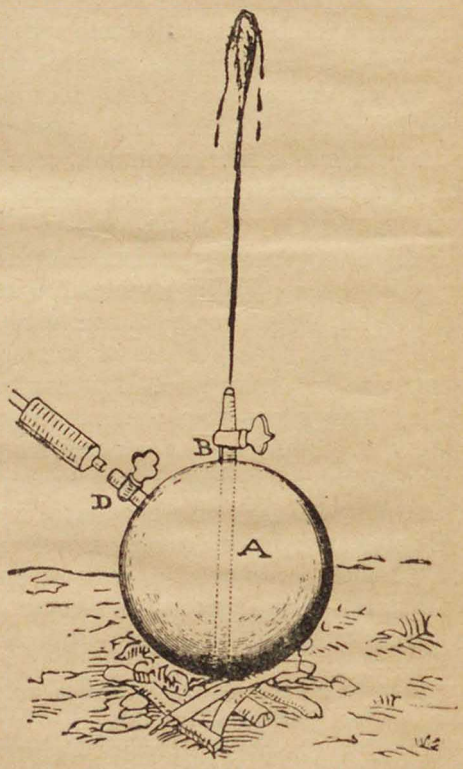
и мы будем говорить о нем в отделе паровых турбин. Но кроме того в сочинениях Герона («Пневматика» и «Театр автоматов») встречается большое количество описаний приборов, основанных на действии давления воздуха и пара, идеи которых могли быть использованы позднейшими изобретателями.

Сочинения Герона пользовались большим распространением в средние века и, повидимому, оказали известное влияние на некоторых изобретателей первых аппаратов для подъема воды посредством давления пара.

Предложение итальянского инженера Бранка (1626 г.) мы тоже относим в отдел паровых турбин. Приводим дальше только краткие сведения о некоторых из



Фиг. 1



Фиг. 2

предложений XVI и начала XVII столетий; сведения эти, к сожалению, очень кратки, а иногда и не вполне достоверны.

Сюда относятся, прежде всего, упоминания о некоторых видоизменениях эолипила (Кардан — 1557 г., Филиберт Делорм — 1567 г.) и о некоторых изобретениях, выдвигаемых старыми историками с вышеуказанными «патриотическими» целями. К последней категории принадлежит, например, испанец Бласко де-Гаре (1543 г.), заслуги которого в деле применения силы пара совершенно отрицаются позднейшими исследователями. [1]

Большое внимание привлекал к себе в прежнее время Саломон де-Ко (Salomon de Caus), французский архитектор, родившийся в 1576 г.

[1] F. Reuleaux, цит. соч., стр. 11.

и издавший в 1615 г. сочинение, в котором глухо говорится о возможности подъема воды посредством действия огня. Араго [1] (и некоторые другие французские писатели) приписывали де-Ко честь изобретения паровой машины. На самом же деле Саломон де-Ко высказывает только мысль о подъеме воды из шара, в котором образуется пар. Эта мысль еще раньше (в 1601 г.) высказана была итальянцем Джиованни делла-Порта и облечена им даже в несколько более совершенную конструктивную форму, чем это сделано у де-Ко (ср. фиг. 1 — прибор Джиованни делла-Порта и фиг. 2 — прибор С. де-Ко).

Кроме этой мысли, ничего другого не заключается в сочинении де-Ко (S. de Caus. Les raisons des forces mouvantes. Paris, 1615), имеющемся в библиотеке Академии Наук.

Вообще же это сочинение де-Ко по содержанию и по форме примыкает к ряду итальянских и французских трудов по гидравлике конца XVI и начала XVII столетий, примерами которых являются сочинения:

Ramelli. Le diverse et artificione machine del capitano Agostino Ramelli. Parigi, 1588 (текст на итальянском и французском языках).

Vittorio Zanca. Nuovo Teatro di Machine et Edificio.

Во всех этих сочинениях дается ряд описаний машин, служащих преимущественно для подъема воды. Движущей силой у них являются люди, животные и гидравлические двигатели (в книге Цанка приведены кроме того и архитектурные сведения).

Аналогичный характер носит и позднейшее сочинение:

Isaac de Caus. Nouvelle invention de lever l'eau plus haut que sa source. Paris, 1657.

Имеются еще сведения о патенте, выданном англичанину Давиду Рамсаю (David Ramsay) на изобретение, цель которого «поднимать воду из глубоких колодцев посредством огня» (английский патент от 21 января 1630 г.), но никакого дальнейшего объяснения в этом патенте не содержится.

Гораздо больше внимания возбудил к себе маркиз Ворчестер (Eduard Sommerset, Marquis of Worcester). В патенте на свое изобретение, взятом в Англии 15 ноября 1661 г. (№ 131) и в описании своего изобретения [2] он характеризует его как «работу водой и огнем» и описывает в следующих выражениях: «поднимание воды посредством огня является более замечательным и сильным способом, чем втягивание и всасывание ее кверху, потому что последнее совершается только на определенную высоту. Этот же способ не имел бы пределов, если бы сосуды были достаточно прочны. Так я взял, например, часть целой пушки, которой конец был надтреснут, и наполнил ее на три четверти водой. Когда я закупорил и завинтил надтреснутый конец и отверстие для зажигания и развел под этой пушкой постоянный огонь, то по прошествии 24 часов она лопнула с страшным

[1] F. Arago, цит. соч.

[2] В книге, которую сокращенно называют «Century of Inventions», вышедшей в 1663 г. (в § 68).

треском. Таким образом, после того как мне удалось укрепить мои сосуды и наполнить их один после другого, я увидел, как вода била постоянным фонтаном в 40 фут. вышиной. Человек, управляющий аппаратом, должен только поворачивать 2 крана таким образом, чтобы наполнять водой сосуд, когда он израсходовал свою воду, и в это время работать другим сосудом и продолжать эту работу попеременно, поддерживая постоянный огонь, что может сделать тот же человек в промежутки между поворачиванием кранов».

Это описание, не сопровождаемое никаким рисунком, заставляет думать, что изобретение маркиза Ворчестера было видоизменением изобретений Порта и де-Ко и состояло из двух сосудов, работавших попеременно паром высокого давления из отдельного парового котла.

Сведения о постройке машины Ворчестера в Англии неясны и сомнительны (так как он вскоре после напечатания своего сочинения умер — в 1667 г.). [1]

Имеется, наконец, еще один изобретатель, работавший тоже над вопросом поднятия воды посредством огня и водяного пара, именно англичанин Морланд (Morland), работавший сначала в Англии, а затем во Франции при дворе Людовика XIV. В 1683 г. он издал сочинение на французском языке, где говорится тоже о подъеме воды посредством силы пара, причем приводятся некоторые числовые данные относительно свойств водяного пара, а также некоторые данные о машине, проектируемой Морландом: при диаметре, равном 608 мм, и ходе поршня, равном 1 219 мм, она должна была давать работу подъема, равную 1 920 фунто-футов в минуту (т. е. 0,06 л. с.). Конечно, результат этот даже для того времени не мог обещать практического применения.

Папин и Сэвери

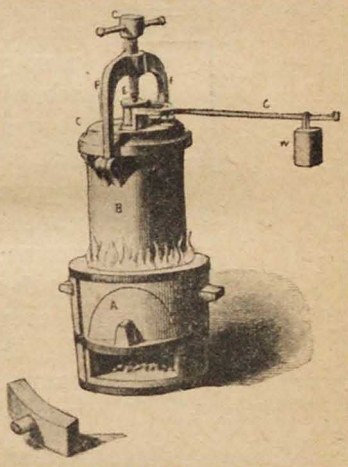
Характерной чертой почти всех изобретений, перечисленных на предыдущих страницах, является стремление создать аппарат, в котором движущая сила пара применялась бы именно для подъема воды на известную высоту. Из общего обзора состояния и запросов промышленности в XVII и в начале XVIII вв. в передовых странах Европы видно, что именно эта задача и являлась наиболее актуальной. Поэтому совершенно понятно, что и дальнейшие изобретатели почти до конца XVIII столетия стремились преимущественно к той же цели. Первыми изобретателями паровых водоподъемных устройств, относительно которых мы имеем более точные и

[1] В настоящее время вопросом о паровом водоподъемном насосе маркиза Ворчестерского много занимается английский историк техники W. H. Thorpe, предпринявший весьма интересные исследования, хотя и не приведшие к окончательному решению проблемы. Последняя работа Thorpe'a опубликована в трудах Ньюкоменовского общества за 1932—1933 год: W. H. Thorpe, The Marquise of Worcester and Vouxhall. The Newcomen Society for the Study of the history of Engineering and Technology. Transactions, vol. XIII, London, 1932—1933, pp. 75—88.

определенные сведения, чем о всех предыдущих деятелях, являются Денис Папин (Denis Papin) и Томас Сэвери (Thomas Savery).

Д. Папин родился в 1647 г. во Франции в г. Блуа и получил хорошее образование сначала в иезуитской коллегии, а затем на медицинском факультете в Париже, по окончании которого поселился там же (в 1672 г.) и занялся медицинской практикой. Однако, он вскоре познакомился с Гюйгенсом, под его влиянием оставил медицину и занялся физическими исследованиями, сделавшись сотрудником Гюйгенса. Внимание Папина прежде всего обратилось на вопрос о давлении воздуха и о влиянии давления на температуру испарения воды.

Опыты, касающиеся давления воздуха, были научно поставлены, как было уже указано, в середине XVII столетия Торричелли, Паскалем и Отто фон-Герике. Большое значение давления воздуха, выяснившееся в этих опытах, побудило использовать его как движущую силу в машинах, для чего необходимо было создать разрежение в цилиндре, снабженном поршнем; этот поршень к моменту образования разрежения должен находиться в крайнем своем положении и обратный ход совершать под давлением воздуха. В этом заключается основная идея атмосферных машин. Первые предложения таких машин принадлежат аббату Готфейлю (1678—1682 гг.) и Гюйгенсу (1681 г.). Оба эти ученые предлагали, однако, в качестве движущей силы для создания разрежения, применять не пар, а взрывы пороха внутри рабочего цилиндра и потому могут рассматриваться как пионеры двигателей внутреннего сгорания.

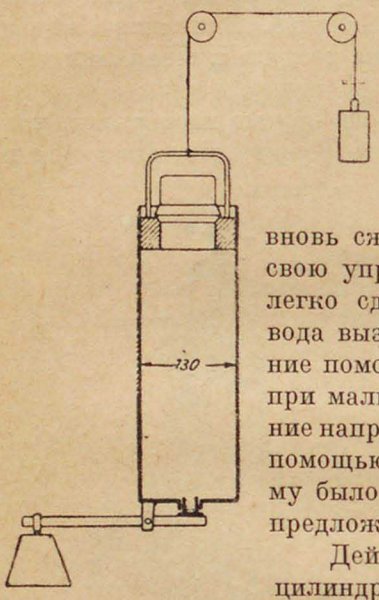


Фиг. 3

По этому же пути пошел первоначально и Папин. В 1675 г. он переселился в Лондон и работал вместе с Р. Бойлем над вопросами, касающимися давления воздуха. Там он предложил (1680 г.) свой закрытый котел для получения пара более высокого давления и, следовательно, более высокой температуры («Папинов котел»).

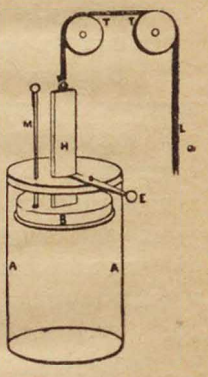
Котел этот изображен на фиг. 3. В нем обращает на себя внимание применение рычажного предохранительного клапана (клапан — S, рычаг — G и груз — W на фиг. 3). В 1687 г. Папин оставил Англию и переселился в Кассель, где поступил на службу к ландграфу Гессенскому. В Марбурге он опубликовал описание передачи энергии на расстояние посредством труб, в которых разрежение вызывается воздушными насосами, но предложение это успеха не имело (как не соответствовавшее ни экономическим условиям, ни техническим возможностям эпохи); тогда Папин занялся (1688 г.) усовершенствованием пороховой машины Гюйгенса и придал ей форму, изображенную на фиг. 4.

На дне цилиндра насыпался порох, при взрыве которого давление воздуха, находящегося в цилиндре, повышалось и часть воздуха выходила из цилиндра через нижний клапан (поднимая рычаг с грузом). Поршень при взрыве поднимался в свое верхнее положение, а затем под давлением внешнего воздуха опускался, совершая ту или иную полезную работу. Опыты с этой машиной не имели успеха и представляли даже большую опасность. Поэтому Папин перешел к осуществлению разрежения другим способом, именно помощью водяного пара.



Фиг. 4

Папин так описывает (1690 г.) идею своего изобретения: «так как вода, будучи обращена в пар помощью огня, имеет свойство быть столь же упругой, как воздух, а затем, после охлаждения, вновь сжимается, совершенно теряя свою упругость, то я думал, что легко сделать машину, в которой вода вызывала бы полное разрежение помощью умеренного нагревания при малых расходах; это разрежение напрасно пробовали осуществить помощью пороха». К описанию этому было приложено изображение [1] предложенной машины (фиг. 5).


Фиг. 5

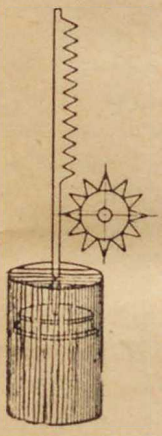
Действие ее следующее: на дно цилиндра A наливается вода, и поршень приводится в нижнее положение, причем воздух выпускается через отверстие в поршне, прикрытое затем штифтом M. Затем дно цилиндра нагревается и вода обращается в пар, который и подымает поршень в верхнее положение, в котором он закрепляется помощью упорки E. Когда пар внутри цилиндра сконденсировался, поршень освобождают, отодвигая упорку E, и давление воздуха заставляет поршень итти вниз, причем это движение является рабочим и во время его может преодолеваться какое-либо полезное сопротивление, для чего служит шнурок L и блоки T. По расчетам Папина, машина эта могла бы при диаметре, равном 610 мм, и ходе поршня, равном 1 200 мм, поднять в минуту 3 600 кг на высоту 1,2 м, т. е. мощность машины была равна:

$$\frac{3\,600 \cdot 1{,}21}{60 \cdot 75} = 1 \text{ л. с.}$$

Неудачной стороной предложения Папина является соединение в цилиндре его машины функций котла, цилиндра и конденсатора позднейших

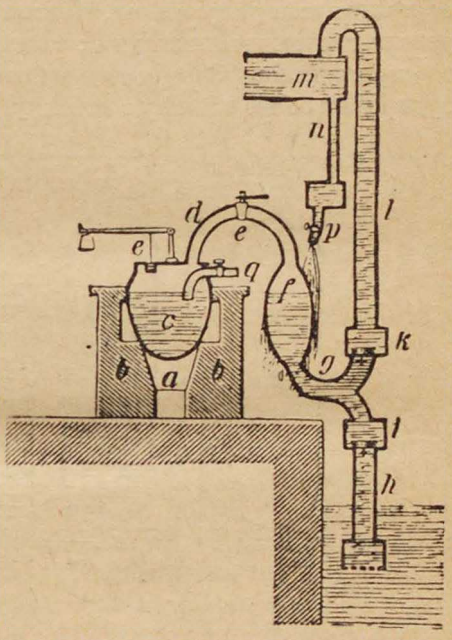
[1] Изобретенная Папиным атмосферная машина изображена в его книге: D. Papin, Traité de plusieurs nouvelles machines, Paris, 1698, фиг. 10.

машин. Самая конденсация пара в цилиндре происходила только под действием охлаждения цилиндра воздухом и поэтому совершалась медленно и неудовлетворительно. Однако, за Папином остается все же заслуга первого предложения и первой попытки осуществления поршневой машины, работающей водяным паром. Значение предлагаемой им машины было для Папина совершенно ясно и он предвидел применение ее в горном деле (что видно из цитаты, приведенной выше). Папин думал также о непрерывно-действующей машине с вращательным движением, для чего он проектировал применение нескольких цилиндров и соединял шток поршня с зубчаткой, приводящей в движение зубчатое колесо, насаженное на вал (фиг. 6).



Фиг. 6

Однако и это предложение Папина не нашло практического осуществления. Затем Папин занялся другими изобретениями и только к концу жизни—в 1701 г. (он умер в 1712 г.) вернулся к изобретению паровой машины, которую он сконструировал, однако, уже совсем по другому принципу, а именно по типу машины Сэвери. О предложении Сэвери нам поэтому нужно будет сказать раньше. Машина Сэвери имела первоначальной целью удовлетворение острой потребности горной промышленности в машине для откачивания воды. Сэвери (родился в 1650 г., умер в 1715 г.) получил патент на свою машину 25 июля 1698 г. (№ 356) сначала на 14 лет, но в следующем году патент этот продолжен был до 1733 г. в виду большого труда и издержек по постановке производства этих машин.

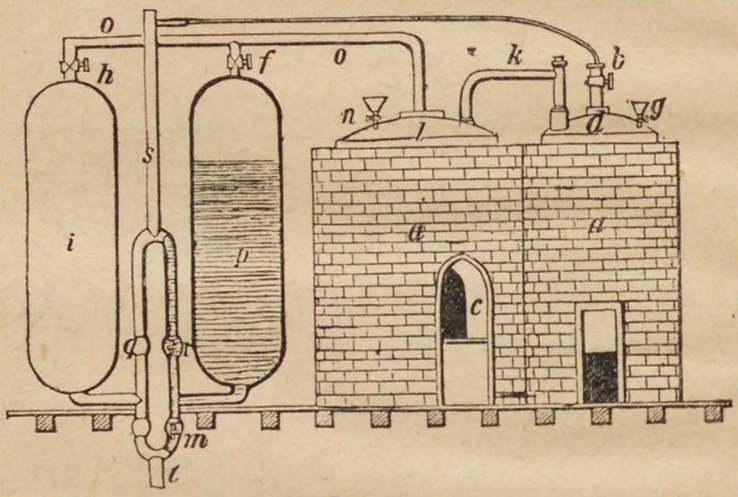


Фиг. 7

Изобретение Сэвери примыкает по идее к предложениям делла-Порта, де-Ко и маркиза Ворчестера, но представляет большой шаг вперед по сравнению с ними. Главная заслуга Сэвери, впрочем, не в самой идее паровой машины для откачивания воды, а в том, что он первый практически осуществил ее и применил для нужд промышленности. Изобретение Сэвери вполне схоже по способу действия с пульзометром, предложенным в 70-х годах XIX столетия американцем Галлем (Hall) и нашедшим довольно широкое распространение в некоторых отраслях промышленности в качестве парового насоса, несмотря

на большое потребление пара.[1] Принцип работы машины Сэвери уясняется из фиг. 7.

Пар получается в котле *c* и помощью крана *e* впускается в сосуд *f*, откуда он вытесняет воду в нагнетательную трубу *l*. Когда таким образом весь сосуд *f* наполнится паром, кран *e* запирают и подвергают сосуд *f* действию холодной воды из трубки *p*, причем пар конденсируется и в сосуде *f* получается разрежение. Поэтому в сосуд *f* вода всасывается по трубе *h* через всасывающий клапан *l* ; затем процесс этот повторяется. Это устройство применялось Сэвери для малых установок; для больших же он сконструировал более сложную машину, изображенную схематически на фиг. 8.



Фиг. 8

В этой установке — 2 сосуда, в которые попеременно доставлялся пар и из которых попеременно, но более или менее непрерывно нагнеталась вода. Кроме главного котла *l* (ближайшего к сосудам *i* и *p*), имелся еще второй котел *d* меньших размеров, служащий для питания первого. Для этого в котле *d* создавалось давление, несколько большее, чем в котле *l*, что вызывало перемещение воды и пара из котла *d* в котел *l* на пополнение в последнем расхода пара; в котел *d* вода подается по ответвлению *b* от нагнетательной трубы. Краны, имеющиеся в машине Сэвери, первоначально открывались каждый порознь, но затем соединены были при помощи одной вращающейся пластинки, что чрезвычайно упростило уход за машиной. Все сосуды были сделаны из меди, так же как и главный паропровод; внешние водопроводные трубы делались из свинца. Котлы снабжены были водомерными кранами. Машину свою Сэвери предназначал для разнообразных целей: для снабжения водой городов и крупных зданий, осушения болот и лугов, а, главное, для откачивания воды из копей (особенно медных копей в Корнваллисе). Для лучшего распространения

[1] C. Matschoss, цит. соч., т. II, стр. 356.

своей машины в копях Сэвери издал особое сочинение «Друг рудокопа», о котором мы уже упоминали. [1]

Однако, применение машины Сэвери именно для копей представляло большие затруднения: высота всасывания могла быть только малой (во всяком случае меньшей 10 м), поэтому для откачивания с большей глубины приходилось ставить машину на большой глубине; но тогда возникали трудности с нагнетанием воды, так как подача на значительную высоту требовала большого давления пара; между тем условия прочности делали рискованным применение давлений выше 3 атмосфер (хотя имеются сведения о применении в некоторых машинах Сэвери давлений до 8 и даже 10 атмосфер). Поэтому высота нагнетания не могла быть взята больше 30 м. В случае бóльшей высоты нужно было устанавливать одну машину над другой, а так как и производительность каждой машины Сэвери была невелика, то приходилось ставить и на одном уровне по несколько машин. Таким образом получалась сложная и неудобная для управления установка. Машина Сэвери имела и другие недостатки: большой расход пара и, при неумелом уходе, опасность взрыва. Стоила она, к тому же, дорого.

В общем, машина Сэвери оказалась наиболее пригодной для отдельных небольших установок с незначительной высотой подъема воды. В этой области машина Сэвери держалась довольно прочно, несмотря на вытеснение ее из горнозаводских установок более совершенной машиной Ньюкомена. Машины Сэвери были усовершенствованы Дезагюлье (Desagulier), применившего смешивающий конденсатор (вместо поверхностного охлаждения у самого Сэвери), введшего предохранительный клапан и распределение посредством двухходового крана. Машины этого типа (с некоторыми другими усовершенствованиями) продолжали строиться до конца XVIII и даже до начала XIX вв. Одна из французских машин этого типа была испытана комиссией, членами которой были Гей-Люссак, Прони и Жирар. Она дала в результате работу, равную 20 151 км, измеренную в поднятой воде на 1 кг сожженного угля. Это дает полный экономический коэффициент полезного действия, равный

$$\frac{20\,151}{7500 \cdot 427} = 0{,}006.$$

(если принять теплотворную способность угля равной 7 500 кал/кг), т. е. около 0,6%. Это значение, конечно, очень мало, но надо заметить, что и машины Ньюкомена часто давали аналогичные результаты.

Относительно машин Сэвери следует отметить еще их раннее появление в России: уже в 1707 г. одна машина Сэвери, построенная Дезагюлье, была выписана Петром I и поставлена в Летнем саду. Эта машина [2] имела сферический котел с объемом, равным 1, 61 м^3, и резервуар, наполнявшийся и опорожнявшийся 4 раза в минуту, объем которого равен был

[1] The Miner's friend. London, 1702.

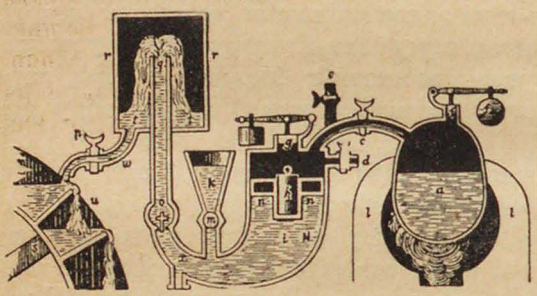
[2] А. А. Брандт, цит. соч., стр. 26.

0,268 м³. Вода всасывалась на высоту 8,8 м и нагнеталась на высоту 3,3 м. По этим данным мощность машины равна

$$\frac{0{,}268 \cdot 1\,000\,(8{,}8+3{,}3)\cdot 4}{60\cdot 75} = 2{,}9 \text{ л. с.}$$

Имеются и другие сообщения о машинах системы Сэвери, поставленных в России.

Нам нужно теперь еще раз вернуться к Папину, чтобы сказать несколько слов о его водоподъемной машине высокого давления, предложенной им в 1707 г. Эта машина примыкает к ряду машин, непосредственно применявших давление пара для подъема воды. В отличие от машины Сэвери в ней нет конденсации пара, а пар выпускается прямо в атмосферу. Несколько позже Папин предложил применить эту машину для получения непрерывного вращательного движения. Для этой цели Папин предполагал направлять воду, поднятую вверх при помощи паровой части его машины, на водяное колесо. Схематическое изображение такой машины дано на фиг. 9. [1]



Фиг. 9

Пар, полученный в котле a, доставлялся посредством трубы c в пространство над поршнем n, причем давление пара выдавливало воду на нужную высоту через трубу q в закрытый сосуд r, служащий воздушным колпаком, откуда она могла быть направлена на водяное колесо (или употреблена как-либо иначе). Всасывающего действия эта машина вовсе не имела, и свежая вода должна была подаваться под давлением через воронку k. Идея о соединении паровой водоподъемной машины с верхненаливным колесом нашла себе позднейшее применение в устройстве, предложенном Риглеем (Rigley) [2] в 70-х годах XVIII столетия и примененном в нескольких местах в Англии (в одной бумагопрядильне в Ланкашире, на механическом заводе возле Лондона). Но в общем рассматриваемая вторая машина Папина также не нашла себе применения. Надо признать, что она представляет скорее шаг назад, как по сравнению с его первой (атмосферной) машиной, так и с машиной Сэвери. Что касается атмосферной машины Папина, то ее следует поставить выше, чем машину Сэвери, так как она являлась выражением новой идеи — получения поступательного движения поршня помощью пара, — идеи, нашедшей применение во всей дальнейшей истории паровой машины. Однако, машина Сэвери была, в свою очередь, лучше машины Папина по осуществлению в ней всасывания воды на известную высоту, тогда как в машине Папина всасывание было вообще невозможно, чем область возможного применения ее чрезвычайно сужалась.

[1] Описание и изображение этой машины дано в книге: D. P a p i n, Nouvelle manière pour lever l'eau, Cassel, 1707г. Оттуда оно перешло во все истории паровой машины.

[2] C. M a t s c h o s s, цит. соч., т. I, стр. 302.

Глава III

АТМОСФЕРНЫЕ МАШИНЫ

Атмосферная машина Ньюкомена

Проблема откачивания воды из копей не была разрешена удовлетворительно, как мы видели, ни Сэвери, ни Папином. Разрешение ее, долгое время остававшееся единственным, было дано атмосферной машиной Ньюкомена (Thomas Newcomen). Биографические сведения о Ньюкомене чрезвычайно скудны.[1] Кузнец по профессии, он не был лишен известного образования, так как был знаком с сочинениями Сэвери и Папина и находился в общении с известным физиком Гуком (Hooke), современником и соперником Ньютона.

С машинами Сэвери Ньюкомен был знаком и практически, так как участвовал в их установке. Он убедился лично в недостатках машин Сэвери и в невозможности устранить ими трудности, связанные с удалением воды из глубоких угольных и медных копей. В 1705 г. он соединился для осуществления своей идеи со своим земляком, стеклянным мастером Коули (Cowley). [2]

Особого патента Ньюкомен не получал, так как патент Сэвери был составлен в очень общих выражениях и предусматривал всякие изобретения в области паровой машины. Но, по соглашению с Сэвери, машина Ньюкомена была включена в его патент.

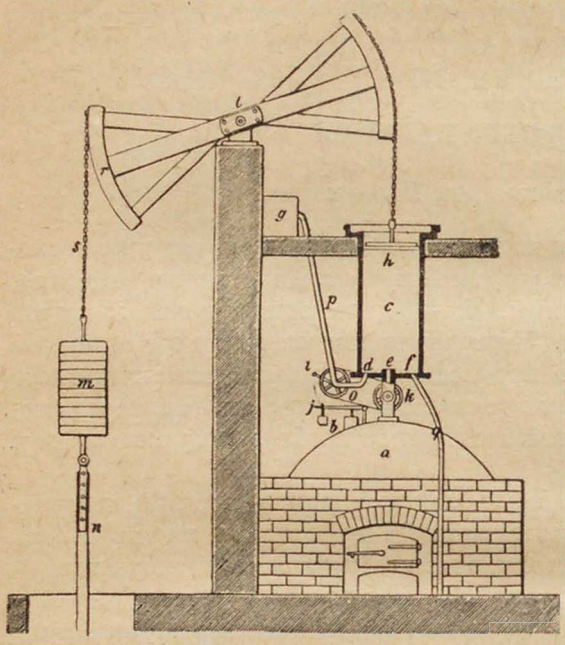
---

[1] Хотя в Англии образовалось специальное «Ньюкоменовское общество» (Newcomen's Society), но и оно не могло получить сколько-нибудь подробных сведений о жизни Ньюкомена, как видно из специальной статьи по поводу 200-летия со дня смерти Ньюкомена: E. C. Smith, The Bicentenary of Thomas Newcomen, Engineering, 19 июля 1929 г. В ней только установлены точно даты его рождения и смерти: 28 февраля 1668 г. и 5 августа 1729 г., и приведены некоторые несущественные сведения о его семье, а затем дается характеристика имеющихся материалов по машинам Ньюкомена, большей частью уже использованных в историях паровой машины.

[2] Сведения о Коули настолько скудны, что самая фамилия его пишется некоторыми авторами иначе: Calley и по профессии он считается в некоторых сочинениях не стеклянным мастером, а землевладельцем-скотоводом. Это разногласие отчасти объясняется близостью английских терминов; стекольщик — «glazier» и скотовод — «grazier».

Машина Ньюкомена представляет собой искусную комбинацию идей Сэвери и Папина. У Сэвери заимствовано отделение котла от цилиндра, у Папина — движение вверх поршня паром, конденсация пара и движение поршня вниз помощью давления воздуха.

Но, кроме того, введена была передача движения от поршня к насосам при помощи балансира и тяг. Конденсирование пара в цилиндре производилось сначала путем охлаждения наружной поверхности поршня водой, но затем в машинах этих перешли к конденсированию пара путем впрыскивания воды в цилиндр.



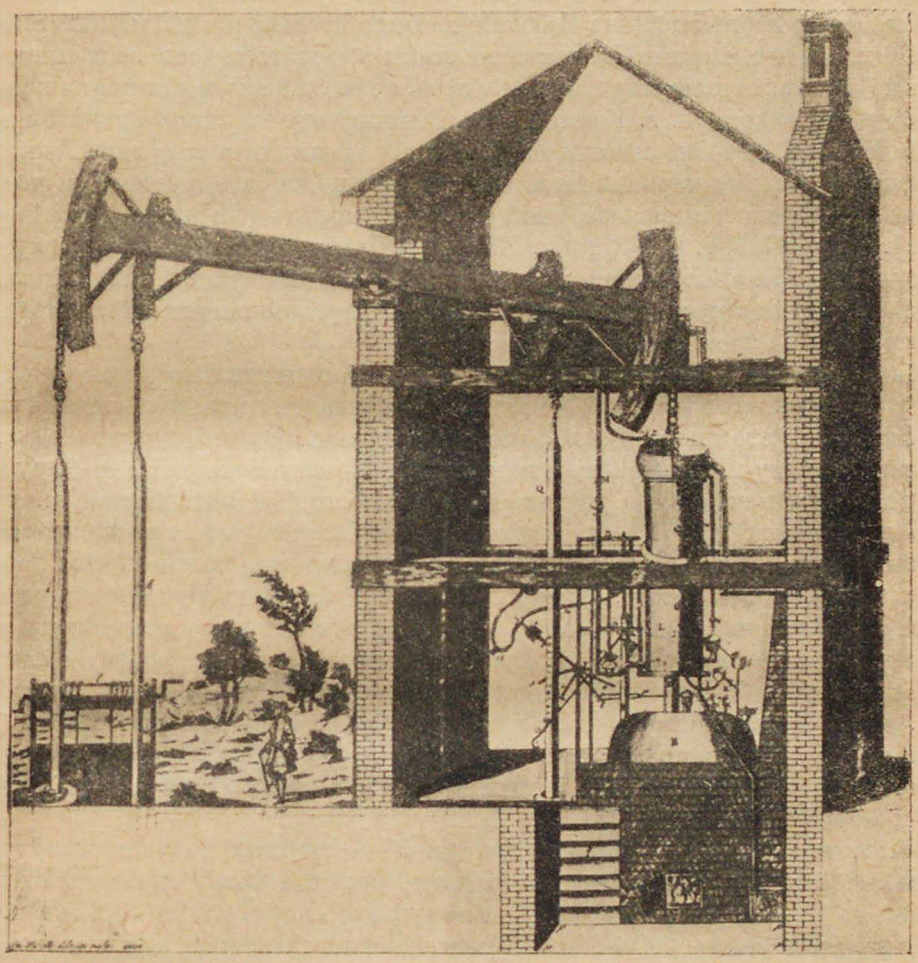
Фиг. 10

Разрез машины Ньюкомена (с охлаждением путем впрыскивания воды в цилиндр) изображен на фиг. 10.

a — котел, c — цилиндр, h — поршень. Охлаждающая вода доставляется из бака g по трубке p через кран i, связанный цепью с краном для пара k, чтобы одновременно закрывать пар и пускать воду. Конденсат и охлаждающая вода стекают вниз из цилиндра по трубе fq; поршень для уплотнения поливается сверху водой. Балансир связан с поршнем посредством цепи, другой конец балансира соединен с тягой n, идущей к насосу. Движение поршня вверх совершается вследствие давления пара, впускаемого в цилиндр, причем этому давлению оказывают содействие грузы m, подвешенные на цепи s. Когда поршень находится возле своего верхнего положения, то открывается кран i (паровой же кран запирается), вода впрыскивается в цилиндр, пар конденсируется, и давление атмосферного воздуха опускает поршень, поднимая одновременно штангу насоса n.

Таким образом, управление машиной сводится, главным образом, к открыванию и запиранию кранов. Первоначально это делалось вручную, но вскоре была устроена передача от балансира (существует рассказ, что это усовершенствование было сделано мальчиком Гемфри Поттером, приставленным для управления этими кранами и желавшим помощью придуманного им устройства облегчить свою работу, но рассказ этот не заслуживает доверия в виду сложности устройства автоматического распределения). Достоверно известно, что усовершенствование распределения в машине Ньюкомена было сделано Бейтоном (Beighton) в 1718 г. Введены были еще другие усовершенствования: поставлен предохранительный

клапан на котел, поставлены деревянные гибкие балки, в которые упирались выступы балансира, чтобы не допустить чрезмерно длинных ходов поршня, введено устройство для автоматического питания котла. В самое производство машин тоже были внесены некоторые улучшения.



Фиг. 11

Таким образом, к началу 20-х годов XVIII столетия выработался некоторый нормальный тип атмосферной машины, который затем в течение лет пятидесяти сравнительно мало менялся. Применение балансира было удобно для водоподъемных машин еще в том отношении, что позволяло приводить в движение от одной машины несколько насосов.

Пример такой машины (1725 г.) с несколькими тягами для насосов и с автоматическим распределением показан на фиг. 11.

Атмосферная машина в этой конструкции, предложенной Бейтоном, получила довольно значительное распространение, главным образом для откачивания воды в копях (в Корнваллисе, в Ланкашире, в Шотландии), но нашла также применение и вообще в качестве водоподъемной машины в городских водопроводах и в водоподъемных устройствах на каналах. В Шотландии первая машина Ньюкомена была поставлена в Эльфингстоне в 1720 г., затем машины Ньюкомена стали вывозиться даже за границу; одна из первых экспортированных атмосферных машин была поставлена в 1729 г. в Венгрии, в г. Кенигсберге. Машину эту поставил англичанин Генри Питтер. Эта так называемая «венгерская машина» имеет особенное значение в истории паровой машины, так как подробное описание и чертеж ее помещены в вышеназванной книге Леупольда (Theatrum Machinarum, Leipzig, 1725, т. II, § 2, табл. XIV). Оттуда они взяты были в русскую книгу Шлаттера «Наставление рудному делу», вышедшую в 1760 г. Книга эта дала толчок к постройке первой русской паровой машины Ползунова, о которой мы будем говорить дальше.

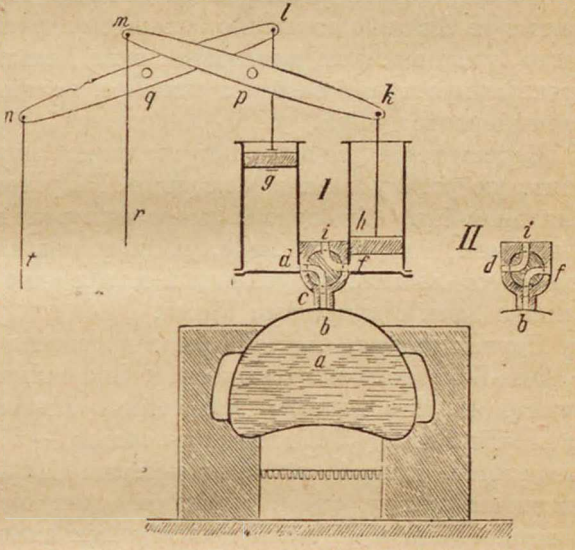
Вначале атмосферные машины строились в Англии только Ньюкоменом и Коули, но в 20-х годах XVIII столетия, с истечением срока патента Сэвери и Ньюкомена, этой постройкой занялись и другие. В особенности следует отметить работу по постройке атмосферных машин Иосифом Горнблоуэром (который начал свою деятельность по постройке этих машин около 1725 г. в Корнваллисе). Деятельность Иосифа Горнблоуэра продолжалась его сыновьями, Джонатаном и Иосифом, которые построили в 1750 г. первую машину для Америки. Иосиф Горнблоуэр поехал для установки этой машины в Америку, где и остался, положив основание производству паровых машин в Америке. Сам же Джонатан продолжал свою работу в Англии, причем в работе этой принимали участие и его сыновья, один из которых, тоже Джонатан, сделался позже изобретателем машины двойного расширения и соперником Уатта. Он вел с Уаттом процессы о патентах, неудачно закончившиеся для него и повлекшие за собой разорение всей семьи Горнблоуэр.

Первые машины Ньюкомена делали 6—8 двойных ходов в минуту; после же введения автоматического распределения число двойных ходов дошло до 10—12. Скорость поршня получалась порядка 0,5—0,6 м/сек., размеры диаметра — 600—800 мм (в позднейших атмосферных машинах Смитона, о которых мы будем говорить дальше, скорость поршня и размеры, а также и мощность были значительно больше). Для вычисления силы давления воздуха на поршень Ньюкомен пользовался, по сообщению Дезагюлье,[1] следующим правилом: диаметр поршня надо возвести в квадрат, перед первой цифрой с конца полученного числа поставить запятую и справа приписать ноль. Тогда цифры до запятой дают давление в центнерах (по 120 англ. фунтов), а после запятой — добавку в английских фунтах. Это правило можно пояснить на примере: первые машины Ньюкомена имели диаметр, равный 22 дюймам (609 мм). Квадрат 22 равен

[1] См. F a r e y. Steam engine, стр. 154, London, 1827, стр. 154.

484, значит давление на поршень равно 48 центнерам, и 40 англ. фунтам, всего $120 \cdot 48+40=5800$ англ. фунт. Расчет этот является сильно преувеличенным, так как в нем вместо площади круга (образующего поршень) берется площадь описанного квадрата, и давление на 1 дм² этого квадрата принимается равным 12 англ. фунт., что дает на 1 дм² площади поршня — 15 англ. фунт., т. е. больше атмосферного давления ($14^3/_4$ англ. фунт. на дм²). Если взять площадь круга (при диаметре в 22 дм), то она получится равной 452 дм² (2 912 см²); приняв полезное давление на 1 дм² площади поршня равным $10^3/_4$ англ. фунт (считая потери в 25—30%) и учитывая температуру конденсата, равную 15° С, получим полное избыточное давление воздуха на поршень в 4 859 англ. фунт. (2 186 кг). Это давление должно было поднимать тяги, половину балансира и груз 1 324 англ. фунт., таким образом на полезную работу остается 3 535 англ. фунт. Средняя скорость поршня при 15 двойных ходах в минуту получалась равной 75 фут/мин. (0,56 м/сек.). Таким образом, получалась работа в $3\,535 \cdot 75 = 625\,125$ фунто-футов в минуту или, принимая 1 л. с. равной 33 000 фунто-футов в минуту (как это позже ввел Уатт), получается мощность, равная

$$\frac{265\,125}{33\,000} = 8 \text{ л. с.}$$



Фиг. 12

Из предложений, относящихся к той же эпохе, что и машина Ньюкомена, следует упомянуть о проектах Леупольда.[1] Идея Леупольда состоит в применении двух цилиндров вместо одного для обеспечения непрерывности действия машины. Он предложил для этого две конструкции: одну, воспроизводящую машину Папина с подачей воды на водяное колесо, но с применением для этой цели двух цилиндров вместо одного. Другая конструкция изображена на фиг. 12.

Она представляет машину высокого давления (т. е. машину, работающую без конденсации). В ней 2 цилиндра, работающих попеременно при помощи четырехходового крана Папина. Поршни обоих цилиндров действуют каждый на свой балансир; эти балансиры предполагаются соединенными с тягами для насосов. Хотя машины Леупольда и не были построены, их все же следует отметить как конструкции, интересные по

[1] Leupold. Theatrum Machinarum Hydraulicarum, т. II, §§ 200, 201, табл. X, III, 1, 2, Leipzig, 1725.

ясному пониманию важности непрерывного действия движущей силы. Идея эта нашла применение в позднейших конструкциях.

Атмосферная машина Смитона

Существенные улучшения в атмосферную машину были внесены Смитоном (John Smeaton). [1] Он первый поставил изучение паровых машин до известной степени на научную почву, выработав методы их испытания и составив на основании результатов испытаний более рациональные правила расчета. В выбор материалов и в конструкцию деталей своих машин он внес также важные усовершенствования.

Несоответствие размеров отдельных частей установок атмосферных машин до Смитона вызывало большие недостатки в их работе: котлы были часто слишком малы для машин и не давали достаточно пара для них, вредные пространства были слишком велики и вызывали большой добавочный расход пара.

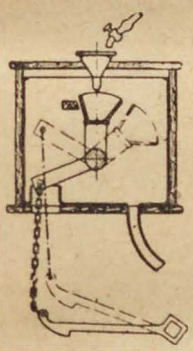
Недостаточно точное изготовление цилиндра и поршня вызывало большую утечку пара через зазоры. На устранение всех этих недостатков Смитоном было обращено большое внимание и приняты меры для их устранения или, по крайней мере, уменьшения. Поэтому машины Смитона долгое время считались лучшими и могли одно время выдерживать конкуренцию даже с машинами Уатта.

Первая машина Смитона была построена в 1772 г. для угольной копи в Лонг-Бентоне возле Ньюкестля. Она отличалась уже гораздо большими размерами, чем до того построенные атмосферные машины. Диаметр ее равнялся 52 дм (1 321 мм); ход поршня — 7 фут. (2,13 м). Общее устройство этой машины то же, что и машины Ньюкомена, но котлов — два, соединенных между собой трубопроводом; один из котлов поставлен под машиной (как в обычной конструкции атмосферных машин), другой — сбоку. Котел сделан весь из железных листов, тогда как до Смитона только нижняя часть котла, обращенная к топке, делалась из железных листов, а верхняя часть — из свинцовых. Цилиндр укреплен на очень прочных деревянных балках, концы которых заделаны в стену. Балансир сделан из большого числа сосновых брусьев, скрепленных шипами. Качания балансира ограничены пружинящими балками, в которые упираются поперечины балансира. Ось балансира — чугунная, в середине имеющая квадратную форму. Цилиндр — железный, исполненный с возможной точностью. Нижняя часть цилиндра имеет форму полушария. Вода доставляется в цилиндр из бака, поставленного наверху. Смитон ввел также в употребление так называемый катаракт, т. е. прибор, регулирующий число двойных ходов в минуту (от нормального — 15—18 в минуту до 3—5 в минуту), а следовательно, и мощность машины.

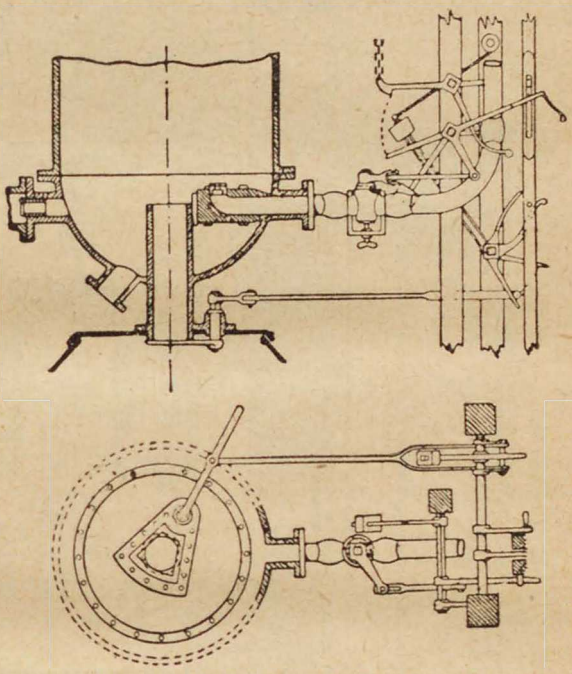
[1] 1724—1792 гг. Он получил хорошее юридическое образование, но занялся инженерной деятельностью, к которой подготовился практической работой в качестве точного механика и путешествием по Бельгии и Голландии. Усовершенствованием атмосферной машины он занялся около 1767—1769 гг., т. е. почти одновременно с Уаттом.

Аппарат этот изображен на фиг. 13.

Он помещался где-либо выше цилиндра, цель его была изменять момент начала впрыскивания. Аппарат этот состоял из вращающегося рычага, каждый конец которого посредством цепи сообщался с рычагом, открывающим доступ впрыскиваемой воде в цилиндр, а верхний конец представлял собою воронку, в которую подавалась вода при помощи особой трубы и крана. При наполнении воронки водой рычаг опрокидывался и занимал положение, показанное пунктиром, причем кран, впускающий охлаждающую воду в цилиндр, открывался, и вода начинала впрыскиваться. Момент опрокидывания зависел от скорости наполнения воронки водой, и это наполнение могло меняться в зависимости от скорости поступления воды в воронку. Эта последняя скорость могла быть изменяема посредством большего или меньшего открытия крана, подающего воду в катаракт.



Фиг. 13



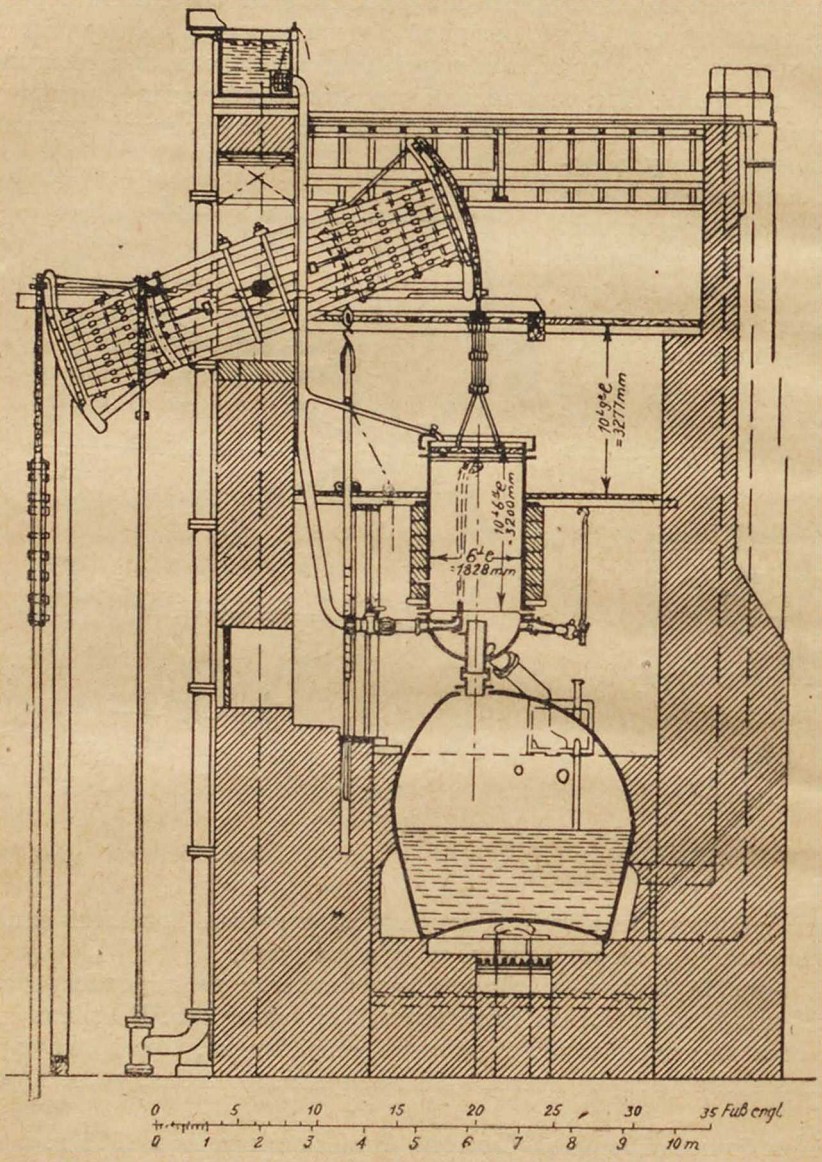
Фиг. 14

На фиг. 14 показана система автоматического парораспределения машин Смитона посредством тяги, идущей от балансира. Как видно из рисунка, система эта сложна и тщательно разработана. Она долго служила прототипом парораспределений в балансирных машинах, даже в уаттовских.

Самая большая машина Смитона была поставлена в 1775 г. в копях Чезуотер в Корнваллисе. Общее расположение ее показано на фиг. 15.

Котлов у нее было три по 15 фут. (4,57 м) в диаметре; один из них под машиной, два — по сторонам. Цилиндр имел диаметр, равный 72 дм (1 829 мм), ход поршня — 9,5—9 фут. (2896—2743 мм), полная длина цилиндра—10 фут. 6 дм (3 200 мм). Машина делала 9 двойных ходов в минуту; несмотря на эти громадные размеры, мощность ее, измеряемая

количеством поднятой воды, равнялась только 76,5 л. с. Помещение для этой машины имело площадь, равную 30×20 фут. (11×6 м), и высоту около 60 фут. (18,3 м). Стены помещения были сделаны из гранита. Громадный



Фиг. 15

балансир, длиной в 27,3 фута (8 321 мм), имел в середине высоту, равную 74 дм (1,88 м), а на концах—60 дм (1,52 м), и ширину в 24 дм (610 мм). Он состоял из 20 сосновых балок, расположенных в два ряда по 10 штук в каждом, скрепленных в середине обручами, деревянными шипами и

железными болтами — 32 болта по 1 дм (25,4 мм) в диаметре. Чугунный квадратный в середине вал балансира вращался своими цапфами (диаметром в 8½ дм, т. е. 216 мм) в подшипниках из красной меди, прикрепленных к деревянным балкам, прочно соединенным с гранитными стенами.

Нижняя сторона поршня покрыта была деревом для уменьшения начальной конденсации пара при впуске; это устройство, предложенное Смитоном, указывает на ясность понимания им важного значения начальной конденсации пара в цилиндре, — явления, борьба с которым проходит через всю историю паровой машины. Успех, который имели машины Смитона в деле откачивания воды из копей, побудил его применить свою машину также для откачивания воды из котлованов при постройках. Но для этой цели установка должна была быть независимой от стен. Такое устройство было спроектировано Смитоном в 1765 г., но осуществлено несколькими годами позже. Здесь неподвижные части машины укреплены были на солидной деревянной конструкции, причем балансир заменен вращающимся колесом, приводимым в движение цепями, идущими от парового цилиндра. Передача к насосу осуществлялась цепями же от второго колеса, насаженного на одной оси с первым. Эта машина делала 10 двойных ходов в минуту и развивала около 4,5 л. с.

Расход пара и использование тепла в атмосферных машинах Смитона

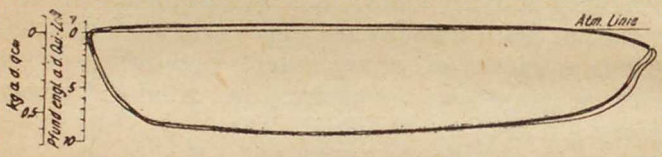
Как было уже выше сказано, Смитон значительно усовершенствовал и расчеты паровых машин и опытное исследование их, которому придавал особенно важное значение. В 1772 г. Смитон составил таблицу результатов произведенных им испытаний для машин разных мощностей (от 1,2 до 78 л. с. при диаметрах цилиндра от 10 до 72 дм, т. е. от 254 до 1 824 мм). Из этой таблицы видно, что, например, машина Смитона в 42 л. с. могла исполнить работу поднятия воды в 10 830 000 фунто-футов при сжигании одного шеффеля (84 англ. фунта = 38,1 кг) лучшего ньюкестльского угля. Эти цифры дают полезную работу, равную 39 299 кг/м на 1 кг угля, что соответствует полному экономическому коэффициенту полезного действия, равному $\frac{39\,299}{8000 \cdot 427} = 0{,}01 = 1\,\%$ (если принять теплотворную способность этого угля равной 8 000 кал/кг). Испытанная машина имела диаметр, равный 52 дм (1 321 мм), и делала $11\frac{1}{2}$ двойных ходов в минуту, длиной в 7 фут. 4 дм. Опыты того же Смитона над 15 атмосферными машинами около Ньюкестля дали гораздо менее удовлетворительные результаты а именно — в среднем подъем 5 590 000 фунто-футов на один шеффель сожженного угля (20 283 кг/м на 1 кг угля), т. е. почти в 2 раза меньше, чем в предыдущем случае. Использование тепла в этом случае не выше, чем оно было в машине Сэвери, о которой у нас говорилось выше.[1] Для

[1] С этими результатами любопытно сопоставить данные, приводимые в книге Шлаттера «Обстоятельное наставление рудному делу», о которой мы говорили выше. Там сообщается (§ 28) (без указания источника), что атмосферная машина

характеристики работы атмосферных машин небезынтересно привести (фиг. 16) индикаторную диаграмму [1] одной из машин, построенных между 1746 и 1760 гг. Диаграмма снята в 1895 г. (сама машина работала до 1900 г.).

Позднейшие видоизменения и усовершенствования атмосферных машин

Главным недостатком атмосферной машины являлось, конечно, слишком большое потребление ею топлива. Этот основной недостаток мог быть устранен только коренными изменениями принципов работы машины. Но у нее были и другие недостатки и прежде всего — непосредственная применимость только для передачи прямолинейного качательного движения от цилиндра паровой машины к цилиндру водяного насоса. Между тем в промышленности все более и более ощущалась потребность в двигателе, могущем давать непосредственное вращательное движение (о чем говорится у нас дальше, на стр. 58). Мы видели, что еще Папин предлагал решить эту задачу посредством включения водяного колеса. Это решение, примененное для машин Сэвери Риглеем, было использовано и в атмосферных машинах.



Фиг. 16

С 1765 г. началось применение атмосферных машин для приведения в движение воздуходувок, причем вначале передача к воздуходувному цилиндру делалась не непосредственно от парового, а тоже при помощи поднятия воды и действия ее на водяное колесо, связанное с воздуходувным цилиндром. Первоначально это устройство действовало неудовлетворительно, и только в 1769—1770 гг. Смитону удалось получить удовлетворительно работающую установку этого рода. Непосредственное же соединение балансира с воздуходувным цилиндром было исполнено только в 1784 г.

Правда, уже Папин предлагал, как показано на фиг. 6, превращать прямолинейное возвратное движение в вращательное посредством зубчатой полосы и зубчатого колеса, а в 1758 г. Фицжеральд (Fitzgerald) проектировал передачу движения от балансира к вращающемуся валу посредством

тратит при нормальной работе («когда оная машина исправно учреждена») в сутки 28 куб. футов каменного угля на подъем в течение каждого часа пятисот восьмидесяти ведер воды на высоту сорока пяти сажен.

Если перевести все данные на метрические меры(задаваясь весом 1 м³ каменного угля, равным 850 кг), то получается работа, равная 24 700 кг/м, т. е. величина, довольно близкая к вышеприведенным данным Смитона.

[1] Диаграмма эта помещена в книге Матчоса, стр.338. Она взята из статьи P e a r s o n, Proc. of the Inst. of Mech. Eng., стр. 683, табл. 19, 1903. В том же журнале помещена статья D a v e y, The Newcomen Engine, 1903, содержащая много важных сведений о машинах Ньюкомена.

зубчатых колес и храповиков, но предложения эти не были разработаны и не были осуществлены.

После успехов машин Уатта, о которых мы будем говорить в следующем отделе, атмосферные машины были вытеснены не сразу: заводы, изготовлявшие атмосферные машины, стали применять в них некоторые из усовершенствований, введенных в машины Уатта, что позволило держаться атмосферным машинам еще долгое время в тех местностях, в которых было дешевое топливо. Так, в атмосферных машинах стали иногда применять отдельный конденсатор (как в машинах Уатта), но без мокровоздушного насоса, [1] а позже — параллелограмм Уатта и шатунно-кривошипную передачу от балансира к непрерывно вращающемуся валу.

В сочинениях по паровым машинам первой половины XIX в. всегда встречается описание атмосферных машин, как особого класса машин, на ряду с машинами Уатта. Так, например, в сочинении Тредгольда, вышедшем в 1827 г. и долгое время считавшемся одним из лучших руководств по паровым машинам, дан такой отзыв об атмосферных машинах: «атмосферная машина превосходна для подъема воды; она может быть построена без затруднений обыкновенными рабочими, и она доставляет очень экономную энергию для гидравлических устройств, для копей, для орошения, для питания каналов и вообще во всех случаях, когда нужно поднимать большие объемы воды». [2] В своем известном сочинении о паровых машинах, вышедшем еще в 1844 г. «Traité des machines à vapeur», Памбур (De Pambours) тоже отводит особый отдел атмосферным машинам.

В одном из первых русских сочинений по паровым машинам, вышедшем в 1817 г. и принадлежащем Картмазову, [3] последний отдает машине Ньюкомена значительное преимущество перед машиной Уатта. Картмазов признает машину Ньюкомена «за превосходное изобретателя творение», а о машине Уатта говорит: «сия новая машина, как несовершенная отрасль первой, никогда не может затмить ни совершенства, ни славы оной, но, однакож, открывает действие паров без помощи атмосферы и дает повод изобретателям к усовершенствованию сей новой машины».

Однако, все усовершенствования, вводимые в атмосферную машину [из них можно упомянуть еще о попытке применения двойного действия пара в одном цилиндре и даже применения пара в двух цилиндрах машин Геслопа (Heslop)], [4] не могли спасти атмосферные машины от полного

[1] Такие конденсаторы без воздушного насоса применялись для обхода патента Уатта. С истечением срока патента (а вне Англии и раньше) строились атмосферные машины с впрыскивающим конденсатором и мокровоздушным насосом. Описание такой атмосферной машины имеется у Тредгольда, франц. перевод, § 400, стр. 297 и табл. VIII, фиг. 2.

[2] Французский перевод книги Тредгольда, стр. 303. Редактор перевода Меллет, исправивший многие места книги Тредгольда, оставляет это место без примечания.

[3] Картмазов смешивает имена Сэвери и Ньюкомена, но имеет в виду именно машину последнего. Книга Картмазова носит название: «Подробное описание паровой машины, устроенной в Великобритании изобретателем оныя г. Сэвери, составлено членом военно-ученого комитета 5 класса Картмазовым, СПб, 1817.

[4] C. Matschoss. Цит. соч. стр. 330—335.

поражения, и вскоре оставались только отдельные экземпляры атмосферной машины, из которых некоторые работали до конца XIX и даже до начала XX столетия. [1]

Атмосферные машины в России. Машина Ползунова

Машины Ньюкомена появились в России сравнительно поздно, что объясняется особенностями русской техники XVIII столетия: копей, которые нуждались бы в откачивании воды с большой глубины, у нас не было, производство пряжи, полотна и сукна носило ручной ремесленный характер и не нуждалось в двигателе. Уральские заводы, являвшиеся главными производителями железа, обслуживались примитивными водяными колесами, которые сохранились на многих из них и в XIX столетии. Однако, все же в горном деле и в некоторых отраслях машино- и судостроения техника стояла более высоко, и применение парового двигателя являлось полезным и желательным. Первая большая машина Ньюкомена, исполненная на Карронском заводе по проекту Смитона, поставлена была в Кронштадте в 1777 г. [2] Она служила для откачивания воды из дока и работала вполне удовлетворительно. Конструкция ее та же, что и других машин Смитона. Но еще раньше постановки кронштадтской машины в России сделана была попытка создания самостоятельной конструкции паровой машины: эта попытка принадлежит Ивану Ивановичу Ползунову, служившему на Барнаульском горном заводе. [3] И. И. Ползунов родился около 1730 г. в Екатеринбурге и был сыном простого солдата. Восьми лет он поступил в Екатеринбургскую «арифметическую школу». Уровень этой школы был, однако, довольно высок, так как в перечне преподаваемых наук упоминаются «плоская тригонометрия, логарифмические вычисления, черчение, рисование и механические правила». Школу он окончил 12 лет (в 1742 г.) и поступил сразу же на Екатеринбургские заводы, где прослужил около 5 лет, а в 1747 г. был переведен на Колывано-Воскресенские заводы, где занимал низшие технические должности и испытывал большую нужду, получая ничтожное жалование. С назначением в Барнаульское комиссарское управление материальное положение Ползунова несколько улучшилось, но деятельность

---

[1] C. Matschoss. Цит. соч., стр. 327 и сл. Davey. Proc. of the Inst. of Mechan. Engineers, 1903, стр. 681 и 691.

[2] А. А. Брандт. Цит. соч., стр. 31. Ср. также R. Thurston. Цит. соч., стр. 76.

[3] Литература по изобретению Ползунова очень велика (описание ее помещено и у Матчосса и в некоторых журнальных статьях на немецком и французском языках). Но оригинальных статей, составленных по первоисточникам, в сущности только две: Воейков. Иван Иванович Ползунов, изобретатель первой в Европе паровой машины в 1774—1766 гг. «Русская старина», 1883 и 1884 гг. М. Н. Южаков. «Шихтмейстер Иван Иванович Ползунов и его паровая машина». Изв. Томск. техн. инст., т. 4, 1907. В последней статье имеется и библиография (впрочем, далеко не полная). Отысканием новых материалов занимается в настоящее время Институт истории науки и техники Академии Наук СССР.

его стала носить административно-хозяйственный, а не технический характер. В 1754 г. он получил, наконец, чин шихтмейстера, уравнивавший его в правах с первым обер-офицерским чином. В 1762 г. ему было поручено лесное и угольное дело. Из имеющихся скудных сведений о жизни Ползунова в Барнауле видно, что он свое свободное время посвящал научным занятиям по физике и механике. Некоторые возможности для этого были, так как в библиотеке Барнаульской школы имелись книги Леупольда и Белидора, представлявшие в сущности всю прикладную механику того времени. Кроме того, там было сочинение Шлаттера [1] на русском языке с описанием «венгерской» машины (о которой мы говорили выше). Это описание и побудило Ползунова начать самостоятельную работу над созданием собственного нового типа паровой машины. В 1763 г. Ползунов подает записку с описанием машины начальнику Колывано-Воскресенского горного округа Порошину, и с этого времени вся его дальнейшая деятельность посвящена осуществлению этой идеи. Записка эта с описанием и чертежом проекта Ползунова [2] представляет собой самый ценный документ из всех материалов, касающихся Ползунова. Такое же значение имеет еще только чертеж исполненной машины с внесенными в нее изменениями, приведенный в статье М. Н. Южакова.

Проект Ползунова был препровожден Порошиным в коллегию Колывано-Воскресенского округа, которая его одобрила, но окончательного решения не приняла, а отослала в Кабинет императрицы Екатерины II, откуда он был передан на рассмотрение Шлаттеру. Последний в общем благоприятно отозвался о предложении Ползунова и оценил те изменения, которые Ползунов ввел в своем проекте по сравнению с машинами Ньюкомена, но сделал некоторые замечания, которые были пересланы Ползунову. Ползунов внес некоторые изменения в свой проект, а затем, пользуясь предложением канцелярии Горного округа, приступил в 1764 г. к постройке своей машины. Закончить эту постройку Ползунову не удалось, так как 18 мая 1766 г. он скончался от чахотки, и машина была закончена учениками Ползунова — Левзиным и Черницыным.

Не останавливаясь на многих интересных и характерных для той эпохи сношениях Ползунова с разными учреждениями и учреждений друг с другом, переходим прямо к описанию первоначального и окончательного проектов Ползунова и к их оценке.

---

[1] О книгах Леупольда, Белидора и Шлаттера говорилось выше.

Полное заглавие книги Шлаттера следующее: «Наставление рудному делу, состоящее из четырех частей, в которых описаны рудокопные места, жилы и способы для приску оных, також учреждение новых рудников, потребные к рудному произведению машины и разобрание, толчение и промывание руд с прибавлением о добывании каменного угля, сочиненное и многими чертежами изъясненное действительным статским советником, берг-коллегии президентом и монетной канцелярии главным судьею Иваном Шлаттером. Печатано при Императорской академии наук 1760 года».

[2] Она напечатана впервые Воейковым в цитированной статье в «Русской старине», 11, 1883, и перепечатана в статье М. Н. Южакова (приложение 1 и 2).

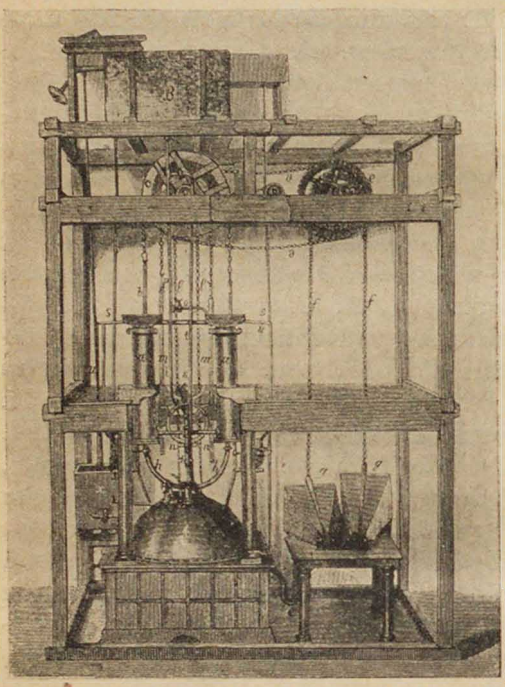
БИБЛИОТЕКА имени

Идею первоначального проекта Ползунова можно усмотреть из фиг. 17, представляющей копию модели машины Ползунова, находящуюся в Барнаульском горном музее. [1]

Машина представляет ряд существенных отличий от атмосферных машин того времени:

1) В ней имется не один цилиндр *(a* и *a)*, а два, действующие попеременно.

2) Передача от поршней сделана не к балансиру, а к шкивам, соединенным с поршнями помощью цепей.



Фиг. 17

3) Передача от шкивов сделана не к насосу, а непосредственно к мехам, предназначенным для вдувания воздуха в металлургические печи.

4) Введена оригинальная система паро- и водораспределительных органов, значительно отличная от системы, принятой в машинах Ньюкомена.

От этого проекта при исполнении машины сделаны были существенные отступления:

1. Цилиндров оставлено два, но вместо передачи к одному шкиву сделана была от каждого передача к своему балансиру.

2. В соответствии с этим ось главного вала машины поставлена теперь параллельно плоскости, проходящей через середину цилиндров, тогда как в первоначальном проекте она была перпендикулярна к этой плоскости.

Эти изменения, сделанные Ползуновым, повидимому, под влиянием замечаний Шлаттера, сильно приблизили машину Ползунова к типу машин Ньюкомена, но все же остались еще существенные отличия от последних.

Машина Ползунова была испытана 23 мая 1766 г., причем, хотя и были мелкие неполадки, но в общем она работала удовлетворительно. [2]

Опыты с машиной Ползунова закончились 12 октября 1766 г., причем за время ее работы выплавлено было руды 9 037 пудов 10 фунтов. Однако, дальнейших работ с машиной Ползунова не производилось, и машина бездействовала до 1779 г., когда прислан был указ о ее разборке, причем

[1] В статье М. Н. Южакова имеется хорошо исполненный чертеж этой же машины.

[2] См. цит. статью М. Н. Южакова, приложение 29.

разборка эта мотивирована тем, что «по довольству при плавильных печах воды никакой нужды в ней не настоит».

М. Н. Южаков приводит также выдержку из сочинения академика Палласа «Путешествие по разным местам российского государства», в котором он вкратце описывает машину Ползунова и касается причин ее остановки. Он говорит прежде всего о неудовлетворительности металлургического процесса, получаемого при работе этой машины (насколько можно понять объяснение Палласа — от слишком большой скорости и протекания воздуха из мехов в печь, отчего в шлак переходило слишком много металла), а затем высказывает мнение, что работу мехов можно было бы «лучше машинами, кои бы действовали посредством лошадей произвести, нежели сею, которая столь дорого стоит».

Так печально сложилась участь наиболее оригинального из предложений, сделанных русской паротехникой не только в XVIII, но и в большей части XIX в. Предложение Ползунова разделило судьбу проектов Папина и большого числа изобретателей, идеи которых не соответствовали непосредственным нуждам промышленности данного момента. Но большинство таких преждевременных предложений не идет далее статей, книг, патентов, тогда как предложение Ползунова было не только хорошо технически разработано, но даже осуществлено и показало свою техническую пригодность.

Переходя к оценке изобретения Ползунова и к сравнению его с предшественниками и современниками, в том числе и с Уаттом, нужно прежде всего внести ясность в самую постановку вопроса: в истории развития паровой машины изобретение Ползунова не сыграло никакой роли, вследствие быстрого прекращения работы машины и ее разрушения, а потому и полной неосведомленности сколько-нибудь широких кругов об этом изобретении, т. е. по обстоятельствам, совершенно независящим от качества предложения Ползунова. Таким образом вопрос об оценке изобретения сводится к оценке индивидуальной одаренности самого Ползунова и оригинальности изобретения. Первая не подлежит никакому сомнению: изложение записки Ползунова отличается чрезвычайной ясностью мысли, самые расчеты силы давления сделаны совершенно точно, и правильны указания на необходимость опытного определения некоторых величин сопротивлений, которые не могут быть определены расчетом.

Конструктивное оформление предложения Ползунова тоже производит самое благоприятное впечатление. Трудности, констатированные при пуске в ход машины и в коротком периоде ее работы, нисколько не говорят против нее, так как при испытании новой конструкции они почти неизбежны: и у Уатта, и у позднейших изобретателей (например, у Дизеля) встречались аналогичные затруднения. Нет никакого сомнения в том, что при участии самого Ползунова в дальнейшей работе эти недостатки были бы преодолены.

Что касается оригинальности конструкции, то она тоже имелась в машине Ползунова: применение двух цилиндров упоминалось, правда, как было указано выше, у Леупольда, но осуществлено оно не было,

и в отношении осуществления этой идеи машина Ползунова является несомненно первой, так как машина Геслопа с двумя цилиндрами была патентована и исполнена значительно позже, а именно только в 1790 г. [1]

Цепная передача к шкиву вместо балансира является вполне оригинальной идеей Ползунова, как так аналогичная конструкция в переносной машине Смитона была только спроектирована в 1765 г., а осуществлена, как было указано, несколькими годами позже.

Наконец, сравнение с машиной двойного действия Уатта неправильно. Так, главное значение последней заключалось в переходе к непрерывному вращательному движению вала, а не в постоянном действии силы пара. Именно этот переход к непрерывному вращательному движению обусловил совершенно исключительное значение в технике и промышленности этой машины Уатта. Между тем, машина Ползунова (особенно в исполненной конструкции) представляла в сущности комбинацию двух одноцилиндровых машин с самостоятельным балансиром и передачей от каждого к рабочему органу, имеющему качательное движение.

[1] Английский патент 7 июля 1790 г., № 1760 (Engineer, 24 января 1879 г.).

Глава IV

УАТТ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ, ВНЕСЕННЫЕ ИМ В ПАРОВУЮ МАШИНУ

Промышленный переворот XVIII столетия в Англии

Несколько раньше середины XVIII столетия наметился в Англии крупный переворот в главных отраслях промышленности, повлекший за собой и постановку новых проблем в области паровых двигателей. Раньше всего крупные изменения произошли в текстильной промышленности. В первой главе нашего труда было уже сказано, что в конце XVII и в начале XVIII вв., наряду с шерстяной промышленностью, в Англии стала развиваться и хлопчатобумажная. Меры против ввоза индийских хлопчатобумажных тканей (принятые в 1719 г.) послужили только к развитию собственной хлопчатобумажной промышленности, особенно в Ланкашире, вследствие близости его к главному пункту ввоза хлопка—Ливерпулю и вследствие крайне благоприятных климатических условий (температура и влажность) Ланкашира для развития в нем этой промышленности. Первоначально промышленность эта носит такой же домашний характер, как и шерстяная, но уже около 1750 г., по крайней мере в области ткачества, начинают возникать предприятия более крупного размера, с сосредоточением нескольких рабочих в одном помещении. Такие предприятия стали возникать преимущественно в районе Манчестера.

Но настоящий фабричный характер ткачество могло получить только с применением соответствующих машин.

Первое важное для текстильной промышленности изобретение и было сделано именно в области ткачества. Это был автоматический челнок («flying shuttle»), который позволял ткать одному рабочему более широкую ткань и, кроме того, вообще увеличивал производительность труда рабочего. Это изобретение было предложено Джоном Кеем (Кау) в 1733 г. Несмотря на противодействие, которое это изобретение встретило среди ткачей (справедливо опасавшихся ухудшения своего положения при распространении этой машины), оно все же стало к 1760 г. получать большое распространение в Англии. Применение летучего челнока нарушило равновесие между производством пряжи и спросом на нее со стороны ткачей: вследствие увеличения производительности труда последних пряжи стало не хватать, что создало острое положение в области ткачества. Эта

потребность в увеличении производства пряжи вызвала необходимость в механизировании прядения. Таким образом, применение автоматического челнока явилось первым звеном целого ряда изобретений, повлекших за собой полное изменение характера текстильной промышленности, превращение ее в крупную фабричную промышленность. Первым дальнейшим шагом на этом пути было изобретение прядильных машин. Первоначально (в 1758 г.) они были предложены Джоном Уайаттом (Wyatt) и Льюисом Полем. Но изобретение это успеха не имело, и только через 20 лет были предложены машины, разрешившие задачу механического прядения. Это была прялка «Дженни» (Spinning Jenny) Джемса Харгривса (Hargreaves) (патент 1770 г.) и «водяной станок» (Water Frame) Ричарда Аркрайта (Arkwright) (патент 1769 г.). «Дженни» была машина не очень сложная и недорогая. Поэтому она нашла применение в домашнем прядении, заменяя несовершенные простые самопрялки. Машина же Аркрайта повлекла за собой полный переворот в хлопчатобумажной промышленности. Несмотря на ряд процессов патентного характера,[1] вызванных применением этих машин, окончившихся в 1785 г. аннулированием патента Аркрайта, фабрики Аркрайта продолжали развиваться и процветать, представляя собой первый пример крупных капиталистических предприятий. Изобретения Аркрайта и Харгривса нашли дальнейшее развитие в виде изобретения «мюль-машины» или «мюль-дженни» (Mule-Jenny), построенной в 1779 г. Самуэлем Кромптоном (Crompton) и представлявшей собой соединение принципов дженни и водяного станка. Мюль был усовершенствован в 1790 г. шотландским фабрикантом Вильямом Кэлли, причем последний придал ему характер крупной машины, приводимой в движение водяной силой.[2] Мюль становится излюбленной машиной для крупного производства пряжи.

Толчок, данный прядильному производству применением только что названных машин, повлек за собой перепроизводство пряжи. Отсюда возникло стремление создать автоматический ткацкий станок. После неудачных попыток ряда изобретателей осуществить такое изобретение удалось Картрайту (Cartwright) в 1785 г. Картрайту тоже пришлось выдержать большую борьбу за проведение в жизнь своего изобретения, но около 1800 г. оно стало получать большое распространение, окончательно завершая процесс превращения текстильной промышленности в крупное фабричное производство.

Возникающие фабрики имели уже довольно крупные размеры: на них было занято от 150 до 600 рабочих. Они нуждались в двигательной силе, притом довольно большой мощности. Таковой в то время могла быть только водяная сила. Поэтому новые фабрики возникают в тех местах, гда легко было сделать запруды и поставить водяные колеса: в Ланкашире на р. Мерсей, в графстве Дерби и в Шотландии на р. Клайд.

[1] Аркрайт обвинялся, повидимому с основанием, в том, что выдал за свое изобретение некоего Кея (однофамильца изобретателя автоматического челнока).

[2] Как, впрочем, и «водяной станок» Аркрайта, на что указывает и самое его название.

Эта связанность с определенными районами (при невозможности в то время передавать водяную энергию на сколько-нибудь значительное расстояние) являлась, конечно, препятствием для развития хлопчатобумажной промышленности. Это обстоятельство вызвало спрос на другой источник энергии, кроме водяной. Как мы видели, в текстильной промышленности нашли себе некоторое применение атмосферные машины, подающие воду на водяные колеса, но это решение было крайне неудовлетворительно вследствие малой экономичности атмосферных машин, еще увеличивающейся введением гидравлической передачи. Таким образом, в текстильной промышленности создалась острая потребность в экономичном паровом двигателе с непрерывным вращательным движением. Усовершенствования, введенные Смитоном в атмосферную машину, были недостаточны для выполнения этой задачи.

Железоделательная и каменноугольная промышленность в Англии в XVIII столетии

Мы видели, что к концу XVII и началу XVIII столетий железоделательная промышленность в Англии испытывала величайшие затруднения с добыванием древесного угля, на котором она целиком была основана. Попытка Дода Дадлея и других применить для выплавки чугуна каменный уголь не увенчались успехом. В результате, в 20-х и 30-х годах XVIII столетия железоделательная промышленность Англии стала приходить в сильный упадок и в некоторых округах вовсе замерла.

В начале XVIII в. этой же задачей — выплавки чугуна на каменном угле (точнее — на коксе) — начала заниматься семья железозаводчиков Дерби. Старший из этой семьи, «первый» Авраам Дерби, в 1713 г. делал опыты выплавки чугуна из железной руды с применением смеси из кокса, торфа и угольной пыли. Повидимому, он не добился окончательного успеха и умер в 1717 г. Сын его, «второй» Авраам Дерби, продолжая опыты отца, начал их в 1730 г. Только в 1735 г. он, наконец, добился успеха. Но более широкое распространение применение кокса для выплавки железа из руды получило еще позже, после вступления в управление Кольбрукдэльскими заводами (принадлежавшими семейству Дерби) сначала Ричарда Форда (1747 г.), а затем — Ричарда Рейнольдса (1757—1763 гг.), [1] который вместе с Джоном Рёбэком (Roebock) построил отражательную печь для очистки полученного чугуна.

Применение кокса в доменном деле имело своим последствием чрезвычайное увеличение выплавки чугуна, что вызвало потребность в преобразовании методов переработки чугуна на листовое и сортовое железо.

Этим вопросом занялись Петр Оньэнс (Onians), получивший патент 7 мая 1783 г., и Генри Корт (Henry Cort) — патент от 13 февраля 1784 г. Обыкновенно этот способ переработки — пудлингование — связывается с именем Корта. Наконец, несколько раньше (1750 г.) был открыт Гентсмэном (Hentsman) способ получения тигельной стали.

[1] Жизнь Рейнольдса подробно описана у Смайльса (цит. соч., гл. V).

Все эти крупные изобретения в области железоделательной промышленности произвели в ней полный переворот и вызвали чрезвычайное увеличение количества добываемого железа и каменного угля. Уже для этого увеличения добычи угля и железа понадобилось увеличение числа и мощности паровых машин, усовершенствование качества их работы. Но, кроме того, новые методы в металлургии (особенно прокатка, входящая необходимой составной частью в пудлинговый процесс) не везде могли быть осуществлены при помощи водяных колес и часто тоже требовали применения паровых машин с непрерывным вращением.

Из приведенных в настоящем кратком обзоре сведений о развитии крупных видов промышленности в Англии во второй половине XVIII в. видно, что все они нуждались в существенных усовершенствованиях введенной в жизнь в начале этого века атмосферной машины: во-первых, нужно было сделать ее работу более экономной и во-вторых — изменить ее работу так, чтобы получить непрерывное вращательное движение. [1] Ответом на эти запросы явились изобретения Уатта, которые внесли также и другие важные усовершенствования в работу паровой машины. Эти улучшения, предложенные и проведенные в жизнь Уаттом, настолько существенны, что Уатта называют часто изобретателем паровой машины, хотя, как мы видели, создание паровой машины является продуктом длительной работы многих поколений изобретателей. [2]

Джемс Уатт. Его жизнь. Начало занятий паровой машиной

Биография и описание изобретений Уатта входят почти во все истории паровой машины и в труды по паровым машинам и излагаются в очень многих популярных сочинениях.

Но жизнеописаний его, основанных на оригинальных материалах, немного. Главными из этих основных сочинений являются следующие:

1) F. Arago. «Éloge historique de James Watt», Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, vol. XVII, p. 61—

---

[1] В конце XVIII в. задача эта совершенно ясно понималась всеми, занимавшимися паровыми машинами. Так, Прони (Prony) пишет в своем сочинении «Nouvelle architecture hidraulique» (т. 1, Paris, 1790, 137) относительно машины с балансиром (Ньюкомена, которую Прони называет машиной Сэвери): «задача была усовершенствовать паровую машину так, чтобы ее приложения могли делаться более обширными, тогда как раньше они ограничивались подъемом воды».

[2] Это мнение о неправильности приурочения изобретения паровой машины к одному имени Уатта очень ясно формулировано в книге H. W. Dickinson and Rhys Jenkins. «James Watt and the Steam Engine», London, 1927. «Идея, что Уатт был изобретателем паровой машины, является преобладающей у лиц, незнакомых с историей промышленности, но едва ли даже нужно говорить, что эта идея неверна. Прежде чем Уатт родился, Томас Ньюкомен создал машину, которая оказала большие услуги в деле осушки копей и откачивания воды для других целей; в машине же Ньюкомена впервые был применен кривошип для получения вращательного движения для приведения в движение машин».

188. Paris, 1830 (перепечатано в собрании сочинений Араго: F. Arago. Oeuvres, t. I).

Араго знал многих лиц, близких к Уатту, и для составления этой биографии ездил в Англию, где собрал много ценных сведений о жизни Уатта.

2) Muirhead, J. P. The Origin and Progress of the Mechanical Inventions of James Watt. London, 1854.

3) Muirhead, J. P. Life of James Watt with Selection from his Correspondence. London, 1859. (Сочинение, основанное на том же материале, что и 2).

Эти сочинения основаны на письмах и прочих оригинальных документах. Они являются главным источником для всех позднейших жизнеописаний и характеристик деятельности Уатта.

4) Smiles, S. «Lives of Bolton and Watt, principally from the original Soho MSS, comprising a History of the Invention and Introduction of the Steam Engine». London, 1865.

Сочинение это, хотя и не лишено недостатков, свойственных вообще писаниям Смайльса (многословие, недостаточная обоснованность многих суждений и т. п.), однако содержит много ценных материалов, особенно по биографии Уатта, и являлось тоже одним из основных сочинений для всех позднейших жизнеописаний Уатта.

5) H. W. Dickinson and Rhys Jenkins. James Watt and the Steam Engine. Oxford, 1927.

6) Большая монография, написанная по случаю столетия со дня смерти Уатта (1819—1919). Биографические сведения в ней довольно кратки, так как сами авторы говорят, что основной материал исчерпан в более старых работах. Но зато имеются обширные и чрезвычайно ценные новые материалы по изобретениям Уатта и по организации производства паровых машин на заводе Болтона и Уатта в Сохо. В этом труде содержится также обширная библиография сочинений, касающихся Уатта и его изобретений. Эта библиография является исчерпывающей в отношении английской литературы, но с пропусками работ на других языках. Так, в ней не упомянута, например, книга A. D. Ernst «James Watt und die Grundlagen des modernen Dampfturbinenbaues». Berlin, 1897, содержащая превосходное изложение и критическую оценку изобретений Уатта. [1]

Джемс Уатт родился 19 января 1736 г. в городе Гриноке в Шотландии и происходил из чисто шотландской семьи; прадед его погиб во время войн Монроза, сражаясь на стороне пуритан, его дед, Томас Уатт, был преподавателем математики в Гриноке. Отец Уатта, тоже Джемс,

[1] В качестве основного материала по биографии Уатта приводятся еще книги Williamson. Letters respecting the Watt's Family. Greenock, 1840. «Memorials of the lineage, early life, education and development of the genius of James Watt», 1856. Обе эти книги напечатаны для ограниченного круга читателей и не получили распространения вне Англии. Имеются и многие другие специальные сборники материалов, касающихся Уатта, появившиеся в Англии и тоже доступные только там.

жил в Гриноке и занимался там постройкой домов и кораблей, а также торговлей различными предметами, необходимыми для мореходства. В его мастерской производилась починка разных инструментов, и там его сын, знаменитый впоследствии Джемс Уатт, познакомился с ручным мастерством.

Джемс Уатт был болезненным мальчиком, и вследствие этого часто пропускал занятия и не делал особенно больших успехов в школе. Зато он чрезвычайно много читал и рано познакомился с механикой и физикой.

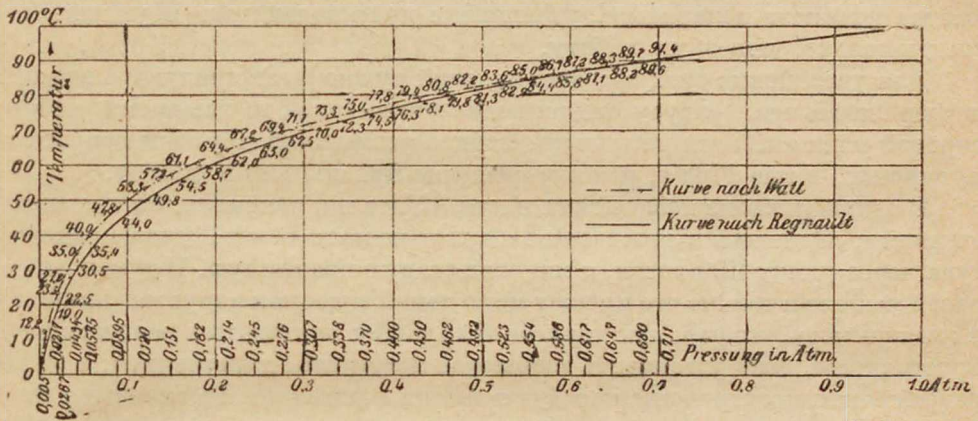
Когда ему исполнилось 18 лет, в 1754 г. он был отправлен в Глазго для подготовки в качестве механика, но пробыл там недолго, так как не нашел подходящих к своим интересам занятий и перебрался в Лондон (в 1755 г.), где работал один год в мастерской Моргана, а затем через некоторое время вернулся в Глазго и обосновался там в качестве университетского механика. Одновременно с этим он открыл при университете мастерскую для изготовления и починки математических и физических приборов. В Глазго Уатт вошел в сношения со многими учеными, между прочим с знаменитым физиком Блеком (изучившим скрытую теплоту испарения водяного пара) и Робинзоном — тогда еще студентом, впоследствии тоже профессором физики. Последний обратил внимание Уатта на паровую машину, для ознакомления с которой Уатт основательно изучил тогдашнюю литературу по этому предмету — сочинения Дезагюлье, Леупольда и Белидора. Уже около 1760 г. Уатт начинает думать о самостоятельных изобретениях в области паротехники: он занимается идеей об устройстве повозки, приводимой в движение силой пара, и производит опыты над свойствами водяного пара, пользуясь котлом Папина, причем строит модель парового цилиндра, работающего на выпуск в атмосферу. Но эти работы не привели к особым результатам и были скоро оставлены. Серьезные занятия Уатта паровой машиной начались в 1763—1764 г., когда ему передали для ремонта модель паровой машины Ньюкомена, принадлежавшую Глазговскому университету. [1]

Во время этого ремонта Уатт был поражен огромным расходом пара в этой машине и объяснил столь большой расход пара охлаждением стенок цилиндра до температуры охлаждающей воды во время ее впрыскивания в цилиндр. Для получения количественных соотношений Уатт произвел ряд опытов над свойствами водяного пара, причем ему помогал своими указаниями Блек. Уатт получил при этом довольно точные результаты: для отношения удельного объема пара при давлении в 1 атм к удельному объему воды он получил число 1 800; по современным данным это отношение получается равным около 1675; [2] в виду крайней трудности опытным путем найти удельный объем сухого насыщенного пара, результат

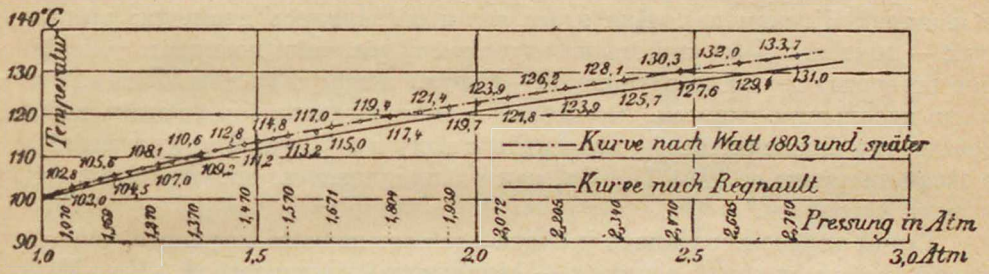
[1] О занятиях своих паровой машиной Уатт оставил чрезвычайно ценное сообщение, им самим написанное для «Британской энциклопедии». Оно полностью напечатано в русском переводе в биографии Уатта: А. А. Радциг. Джемс Уатт и изобретение паровой машины, стр. 31—41, Петроград, 1924.

[2] Кноблаух, Райш, Гаузен и Кох. Таблицы и диаграммы для водяного пара, Энергоиздат, 1933.

этот надо признать весьма удовлетворительным. Еще большей точностью отличалось число, полученное Уаттом для скрытой теплоты пара при давлении в 1 атм — именно около 543 кал/кг, тогда как современное значение для этой величины есть 539,2 кал/кг. [1] Наконец, Уаттом были сделаны определения связи между давлением и температурой пара и полученные результаты нанесены в виде кривых. На фиг. 18 и 19 представлены эти



Фиг. 18



Фиг. 19

кривые [2] для давлений ниже и выше атмосферного, причем для сравнения приведены кривые из опытов Реньо, произведенных в 50-х годах XIX столетия и мало отличающихся от современных данных. Мы видим, что сходство между результатами Уатта и Реньо очень большое.

Из своих опытов Уатт вывел следующее заключение о причинах большого расхода пара в машинах Ньюкомена: стенки цилиндра являются сильно нагретыми во время впуска пара, затем, во время впрыскивания воды, температура их падает до температуры охлаждающей воды. При новом впуске свежего пара последний должен сначала вновь прогреть

[1] Согласно тем же новейшим таблицам.

[2] Эти кривые взяты из книги Ernst. James Watt, Berlin, 1896, стр. 21. Они были напечатаны в первый раз у J. Robison. A system of Mechanical Phylosophy. Edinbourgh, 1822.

стенки и поднять их температуру до температуры, соответствующей давлению впускаемого пара, т. е. приблизительно до 100° (так как давление в котле приблизительно равнялось одной атмосфере). Это делается за счет конденсации входящего пара, причем таким образом теряется теплота испарения этого пара. Во время впрыскивания воды и выталкивания смеси из цилиндра, при пониженном давлении в нем, часть воды на стенках цилиндра начинает испаряться, увеличивая противодавление и уменьшая, следовательно, полезную работу.

Для устранения этих вредных явлений нужно было придумать способ поддерживать температуру стенок возможно высокой во все время работ паровой машины. Уатт несколько месяцев размышлял над этим вопросом и, наконец, в мае 1765 г. искомое решение пришло ему в голову.

В одном из своих позднейших писем [1] Уатт так описывает этот момент открытия: «Однажды в воскресенье я гулял по полю возле Глазго; проходя туда через улицу Шарлотты, я миновал старую прачешную. Я думал о паровой машине и только что прошел мимо дома Герда, как вдруг мне пришла в голову мысль, что пар, как упругое тело, будет притекать в разреженное пространство, если установить сообщение между ним и цилиндром; в этом разреженном пространстве пар будет конденсироваться, не охлаждая цилиндра. При этом я думал, как мне затем освободиться от конденсированного пара и впрыснутой воды (если я буду употреблять впрыскивание, как в машинах Ньюкомена). Для этого мне представилось два пути: во-первых — вода могла бы стекать по спускной трубе, если поместить выпускное отверстие трубы на глубине 35—36 фут., а воздух мог бы быть извлекаем небольшим насосом. Во-вторых — можно было бы сделать насос достаточно большим, чтобы извлекать и воду и воздух. Я не успел дойти в своей прогулке до дома Гольфа, как все предложение вполне уложилось у меня в голове».[2]

Таким образом создалась у Уатта идея его первого крупного усовершенствования паровой машины — отдельного конденсатора. Но Уатт скоро должен был убедиться, как далеко осуществление на практике от возникновения идеи. Немедленно после открытия своего способа постройки машины с отдельным конденсатором, Уатт занялся проверкой этой идеи на экспериментальном приборе. Прибор этот хранится в Соут-Кенсингтонском музее, и чертежи его имеются у Матчосса, [3] но оказывается,

---

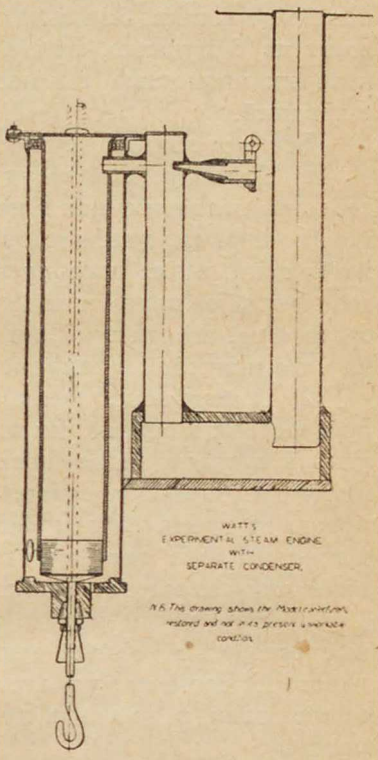
[1] Dickinson and Jenkins. Цит. соч., стр. 23.

[2] Это внезапное и неожиданное разрешение Уаттом проблемы, над которой он долго и безрезультатно думал, является характерным для многих изобретений и открытий и представляет весьма интересную проблему психологии творчества. Его можно сопоставить с известным рассказом знаменитого французского математика Анри Пуанкаре о нахождении основного свойства фуксовых функций; решение этой труднейшей проблемы, над которой он долго и безуспешно работал, «внезапно» пришло ему в голову, когда он садился в дилижанс во время путешествия и совсем, казалось, не думал об указанном вопросе.

[3] Они заимствованы из специальной статьи E. Comper. On the Invention of James Watt and his models, Proc. of the Inst. of Mechan. Engineers, стр. 599, 1833.

что в том виде, в каком сейчас находится модель, она не могла бы работать: там сделано неправильное соединение конденсатора с паровой рубашкой вместо внутренности цилиндра. Можно предположить, что такое неправильное соединение сделано из опасения, чтобы идея изобретения Уатта не была похищена кем-либо другим. Потому мы воспроизводим чертеж, как он изображен в книге Dickinson'a и Jenkins'a[1] (фиг. 20).

Аппарат этот состоит из цилиндра, в котором движется поршень, последний должен при своем рабочем движении вверх поднимать груз, рядом с ним стоит конденсатор, тоже имеющий форму цилиндра; крайний же цилиндр служит воздушным насосом, в котором должен был двигаться поршень, приводимый в движение от руки (не показанный на фиг. 20). При нижнем положении обоих поршней (в паровом цилиндре и в цилиндре насоса) пар подается сверху в паровой цилиндр и наполняет его; одновременно с этим пар подается в паровую рубашку, действуя и на нижнюю сторону цилиндра. Когда поршень воздушного насоса поднимали вверх, то вода, наполнявшая конденсатор, переходила в цилиндр насоса, пар устремлялся в конденсатор и там конденсировался. В цилиндре получался вакуум, и давление пара снизу поднимало поршень и груз.



Фиг. 20

Одновременно с этим аппаратом Уатт занимался также постройкой и исследованием поверхностных конденсаторов. Оба эти исследования подтвердили правильность его основной идеи, и он начал думать о реализации своего изобретения. Для этого нужны были большие средства. Для добывания их Уатт обратился сначала к помощи своих друзей (Блеку и Рёбэку). Последний был собственником крупного Карронского машиностроительного завода. Для этого же добывания средств сам Уатт оставил работу в своей мастерской и принял место инженера по геодезическим и строительным работам. Деятельность эта совершенно не соответствовала характеру Уатта и крайне тяготила его; к тому же все интересы его направлены были в сторону осуществления своей паровой машины, что явилось задачей очень сложной при тогдашнем низком уровне техники обработки металлов. Рёбэк заключил с Уаттом формальный договор, который предусматривал финансирование Рёбэком работы Уатта по осуществлению паровой

[1] Цит. соч., фиг. 12.

машины. Однако и при содействии Рёбэка и Карронского завода это осуществление плохо подвигалось вперед: машина больших размеров, построенная в 1769 г. на Карронском заводе, тоже оказалась неудачной: конденсатор (поверхностный) вышел недостаточно плотным, поршень сильно пропускал пар. Все же в 1768 г. Уатт и Рёбэк подают в парламент заявление о выдаче им патента, как они выражаются, на «способы уменьшения потребления пара и вследствие этого — топлива в огневых машинах». Патент этот, принадлежащий к числу важнейших документов по истории техники, был выдан им 5 января 1769 г. за № 013. Он состоит из 6 пунктов, из которых особенно важны первые четыре, в которых полностью выражена идея предложенных Уаттом усовершенствований.

Вот эти главные пункты:

1) Цилиндр, или сосуд с паром, сохраняется во все время работы столь же нагретым, как и входящий в него пар, и именно вследствие того, что, во-первых, цилиндр окружают оболочкой из дерева или из другого материала, плохо проводящего теплоту; во-вторых, вследствие того, что его окружают паром или другими нагретыми телами и, в третьих, вследствие того, что ни вода, ни другое какое-либо тело, более холодное, чем пар, не приходит в соприкосновение с цилиндром во время его работы.

2) В машинах, которые должны полностью или частью работать посредством конденсации пара, обращение пара в воду должно происходить в сосудах, отделенных от цилиндра, но могущих приходить с ним иногда в соприкосновение. Эти сосуды я называю конденсаторами, и их нужно во время работы машины посредством действия воды или другого холодного тела сохранять холодными с температурой не ниже температуры окружающего воздуха.

3) Воздух и другие газообразные упругие тела, не сгущенные вследствие низкой температуры конденсатора и мешающие работе машины, должны удаляться из конденсатора посредством насосов, приводимых в действие самой машиной или другими каким-либо образом.

4) Во многих случаях я рассчитываю применять упругую силу пара на поршень или другие части, заменяющие его, таким же образом, как применяется атмосферное давление в теперешних обыкновенных огневых машинах. В тех случаях, когда не хватает холодной воды, машины могут работать исключительно силой пара, причем последний по совершении работы выпускается прямо в атмосферу.

Пункт 5 патента говорит о так называемых коловратных паровых машинах, которые не были осуществлены ни Уаттом, ни многочисленными другими позднейшими изобретателями. [1] В 6-м пункте говорится о работе с неполной конденсацией (т. е. такой, которая теперь называется работой с ухудшенным вакуумом), о способах уплотнения поршня и конструкции других машинных частей.

---

[1] Об этих попытках мы говорим ниже.

Осуществление машины простого действия по патенту 1769 г.

Хотя Уатту и удалось получить патент на свою машину (на 14 лет), но до осуществления его идеи было еще весьма далеко. Ближайшие годы оказались самыми трудными в жизни Уатта: неподходящие к его характеру занятия, отвлекающие от работы по осуществлению машины, недостаток материальных средств, тяжелые семейные обстоятельства (смерть жены в 1773 г.), к тому же еще полная приостановка работы по осуществлению его машины вследствие пошатнувшегося финансового положения самого Рёбэка — все эти обстоятельства заставляли Уатта иногда думать даже об оставлении Англии: по инициативе Робизона, работавшего в то время в России в качестве директора Морского училища в Кронштадте, с Уаттом велись даже переговоры о приглашении его в Россию, но от этого переезда его отговорили его друзья, поэт Дарвин [1] и Болтон (с которым Уатт уже вступил в переговоры относительно осуществления своей машины).

В 1773 г. Рёбэк окончательно обанкротился и уступил свои права на осуществление паровой машины Болтону [2] (Matthew Bolton), который заключил соответственный договор с Уаттом.

Болтон был одним из самых крупных инженеров-механиков своего времени. Он является родоначальником группы механиков, [3] поставивших английское машиностроение на высоту, которой долгое время не могли достигнуть другие нации. Болтон имел свой большой завод в Сохо возле Бирмингама.

Завод этот был хорошо оборудован и имел лучших квалифицированных рабочих. Части паровой машины, изготовленные еще на заводе Рёбэка, были перевезены на завод Болтона, там доделаны или заменены новыми и, наконец, первая машина Уатта была закончена в 1774 г.

В конце 1774 г. и первой половине 1775 г. начались ее испытания. Испытания эти дали очень благоприятный результат; они производились под наблюдением Болтона, так как Уатт был бо́льшую часть этого времени в Лондоне, где начал хлопотать в парламенте по продлению патента. По данным, приведенным у Дикинсона, [4] при этих испытаниях получился в метрических мерах подъем около 60 000 кг/м на 1 кг сожженного угля. Этот результат вдвое превосходил результаты, полученные даже

---

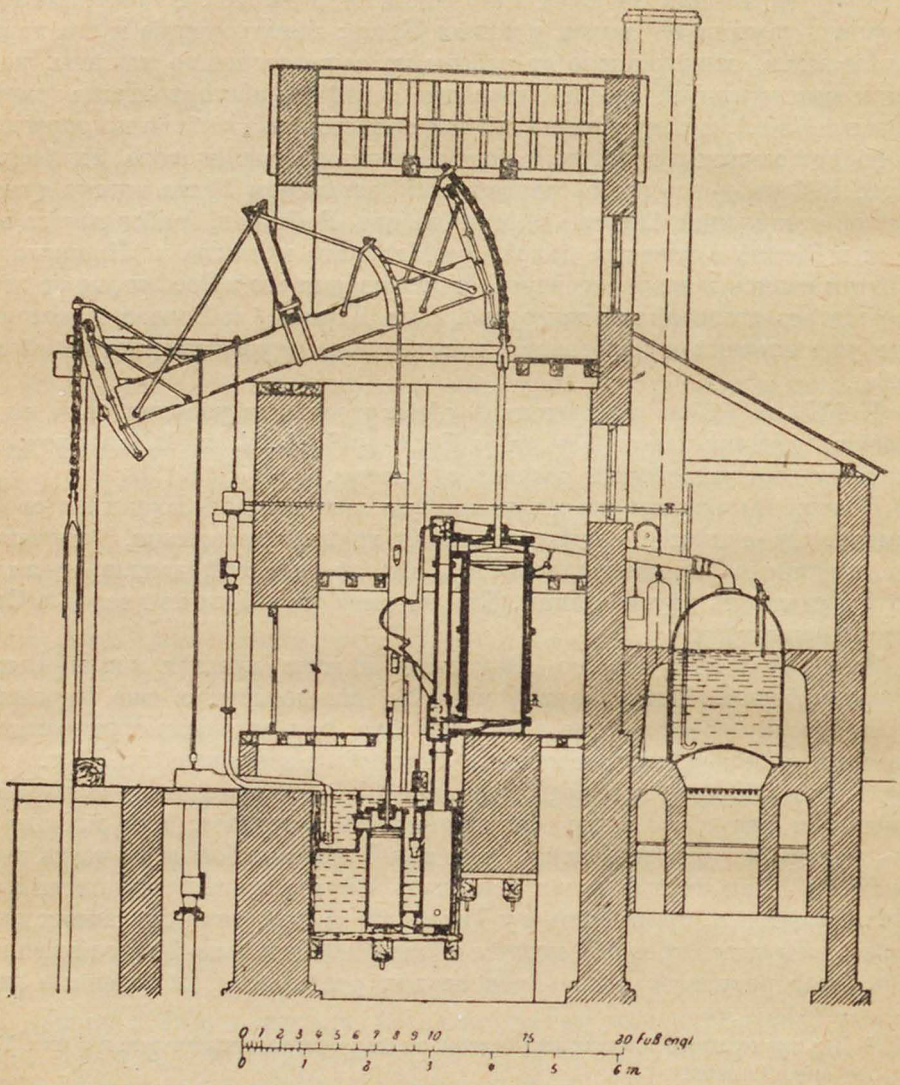
[1] Дед знаменитого естествоиспытателя; он был поэтом и писателем, и с ним Уатт был особенно близок.

[2] Жизнеописание и характеристика Болтона имеются в цитированной выше книге Смайльса «Lives of Bolton and Watt». См. также C. Matschoss. Mathew Bolton, «Beiträge zur Geschichte der Technik», 1, 1909. Много материалов по истории завода Болтона имеется в цитированной книге Дикинсона и Дженкинса, а также у Lord. Capital and Steam Power, London, 1922.

[3] К ней принадлежали: Брама (изобретатель гидравлического насоса), Модлей, Клемент, Муррей, Фикс, Робертс, позже Витворт. Смайльс. Биографии промышленных деятелей, СПб, 1903.

[4] Dickinson and Jenkins. Цит. соч., стр. 110.

в хороших машинах Ньюкомена. Таким образом, первая задача, поставленная Уаттом — достижение большей экономии в работе паровой машины — была достигнута.



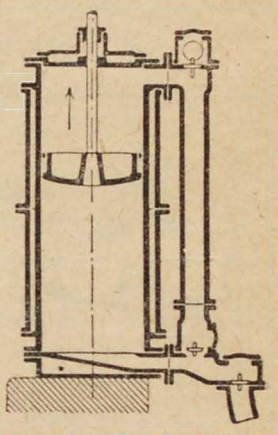
Фиг. 21

Машина эта обнаружила также другие хорошие эксплоатационные качества. В виду таких результатов на машины эти появился спрос со стороны промышленности, а потому Уатту и Болтону нужно было перейти к планомерному проектированию и производству паровых машин. Но прежде чем заняться этой задачей, Уатту и Болтону пришлось хлопотать о продлении патента, так как значительная часть срока первоначального

патента (6 лет из 14) уже истекла. После довольно трудных хлопот патент был продлен еще на 25 лет (22 мая 1775 г.). [1]

В июне 1775 г. Уатт занялся составлением проектов двух новых машин, одной — для воздуходувки на заводе Вилькинсона (на котором раньше был исполнен новый цилиндр для опытной машины Уатта) в Броссели, другой — насосной машины для угольной копи в Блумфольде возле Типтона.

Первая машина была построена целиком на заводе Вилькинсона под надзором Уатта, а для второй машины на заводе Болтона и Уатта были изготовлены только некоторые части. Она была закончена в 1776 г. Тогда же началась постройка некоторых других машин (для винокурни Stratford le Bow возле Лондона, далее — большая машина для винокурни в Bedworth возле Ковентри, насосная машина для Кольвиля). Чертежи этих машин [2] показывают постепенную конструктивную выработку насосного типа паровой машины Уатта.



Фиг. 22

В 1777 г. была построена вторая машина для завода Сохо, получившая название «Вельзевул» вследствие затруднений при налаживании ее работы. Она интересна в том отношении, что в ней Уатт применил отсечку и расширение пара с целью увеличить экономию расхода пара.

По этому же типу была построена другая машина, названная «Старой Лизой» (Old Bess), которая в настоящее время хранится в Соут-Кенсингтонском музее (машина «Вельзевул» была уничтожена пожаром). Вскоре после этого начался усиленный спрос на машины Уатта для медных рудников в Корнваллисе, которые особенно нуждались в экономной паровой машине в виду большой глубины рудников и дороговизны каменного угля. [3]

Таким образом, около 1780 г. выработался тип машин Уатта простого действия, служащих для откачивания воды. К описанию его мы переходим.

Типичная водоподъемная машина Уатта простого действия изображена на фиг. 21. Цилиндр снабжен паровой рубашкой с питанием помощью отвода пара от главного паропровода. Рабочая сторона цилиндра — верхняя, нижняя же сторона сообщается со смешивающим конденсатором. Передача к балансиру сделана обычным образом, помощью цепей. От того же балансира сделана передача к мокровоздушному насосу и ко всем прочим насосам. Парораспределение выполняется помощью клапанов. Порядок действия этих клапанов уясняется из фиг. 22.

[1] Чертежи паровой машины, представленные в парламент, приведены в книге Дикинсона и Дженкинса.

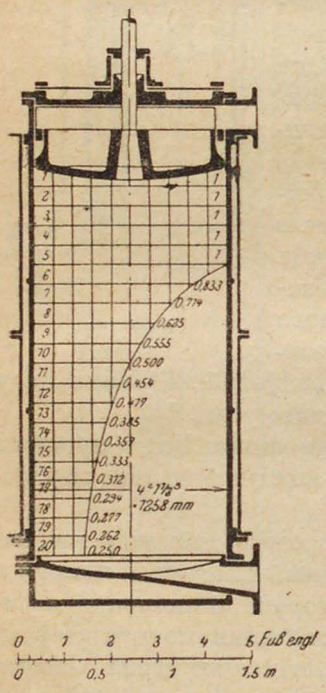
[2] Приведенные в книге Дикинсона и Дженкинса.

[3] Поставка машин для Корнваллиса составляла долгое время главный источник дохода для завода Болтона и Уатта.

Когда поршень находится вверху, то открываются верхний (впускной) и нижний (выпускной) клапаны; последний соединяет внутренность цилиндра с конденсатором. Третий же клапан, соединяющий верхнюю часть цилиндра с нижней — закрыт. Так совершается рабочий ход поршня вниз (при действии давления сверху вниз, равного разности давлений пара и конденсатора). После окончания рабочего хода впускной и нижний выпускной клапаны закрываются и открывается третий перепускной клапан, причем при движении поршня вверх пар переходит из верхней части в нижнюю, самое движение поршня вверх вызывается разностью весов, действующих на плечах балансира слева и справа.

Позднейшие патенты Уатта. Машина двойного действия с непрерывным вращением

В 1782 г. Уатт взял патент (от 12 марта № 1321 г.) на применение расширения пара в цилиндре паровой машины. Это расширение применял, как мы говорили, раньше сам Уатт, но даже и до Уатта в атмосферных машинах расширение применялось не с целью экономии, а с целью более легкой остановки в конце хода. Патентный чертеж Уатта, изображающий работу пара с расширением, приведен на фиг. 23.



Фиг. 23

Впрочем, расширение пара не нашло особенно большого применения в паровых машинах в ближайшее время вследствие отсутствия достаточно хорошо подготовленных машинистов: степень наполнения должна была меняться от руки и для правильного изменения отсечки нужно было понимание действия пара в цилиндре.

При применении отсечки усилие, действующее на поршень в цилиндре, делается переменным, что должно вызвать неравномерное движение поршня. Поэтому в патенте своем Уатт предусматривает особые уравнители давления (веса, цилиндры с движущимися поршнями и т. п.). Они не нашли применения в машинах Уатта, но предлагались не раз значительно позже, например, в прямо действующих насосах Вортингтона (в предложениях применить в них расширение пара).

Почти одновременно с получением этого патента Уатт занялся еще более важным вопросом о построении машины с непрерывными вращательным движением.

Вопрос о преобразовании качательного движения поршня в непрерывное движение вала, в виду его очевидной важности для применения

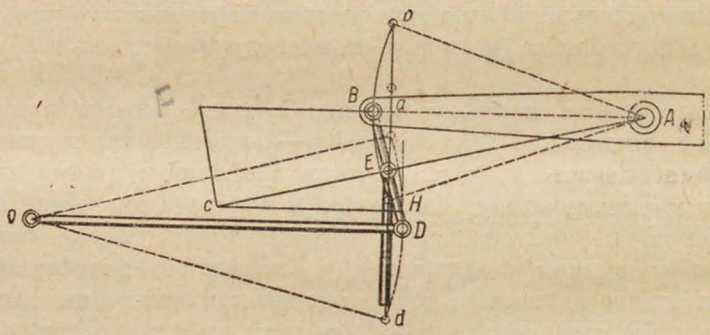
в промышленности (особенно с развитием текстильной промышленности, о котором говорилось выше), занимал, как мы видели, многих изобретателей, но для этого предлагались передачи через зубчатку и зубчатое колесо (еще Папином), комбинации шкивов с цепными или канатными передачами (предложение Гулля для применения к пароходам), но никто не решался применить непосредственной шатунно-кривошипной передачи, так как не был ясен механизм движения поршня в цилиндре: длина хода поршня в цилиндрах тогдашних паровых машин была переменной и конструкторам паровых машин казалась невозможной прямая передача движения с другого конца балансира непосредственно на вал при помощи шатуна и кривошипа. В эту ошибку впадал даже Смитон, давший еще в 1781 г. заключение о невозможности указанной прямой передачи и рекомендовавший придерживаться передачи помощью поднятия воды и водяного колеса (несмотря на очевидную неудовлетворительность последней).[1]

При построении паровой машины с непрерывным вращательным движением возникли два ряда вопросов — кинетические и динамические. Вопросы кинетические сводятся к двум проблемам: передача движения от поршня к одному концу балансира и передача движения от другого конца балансира. При движении поршня вверх усилие должно быть направлено от поршня к балансиру (в отличие от атмосферной машины и машин простого действия); точно так же при движении вниз второго конца балансира тоже давление должно итти от балансира к валу. Таким образом, обе эти передачи должны быть жесткими. Непосредственно соединить конец балансира с штоком поршня нельзя, так как конец балансира описывает дугу, а шток поршня должен двигаться по прямой линии. Первоначально (в патенте 1782 г.) Уатт предполагал произвести передачу от поршня к балансиру, снабдив шток зубчатой полосой, а на балансире поместив зубчатый сектор. Но это соединение оказалось неудачным, так как вследствие зазоров между зубцами в каждом конце хода при перемене направления движения поршня возможны удары. Поэтому он стал искать другого решения и вскоре нашел его в виде одного из гениальнейших своих изобретений, именно в виде механизма, позже названного параллелограмом Уатта (на который взят был патент в 1784 г., № 1433). Он изображен на фиг. 24.

Идея этого механизма заключается в следующем: пусть BA изображает балансир с точкой вращения в A. В раме машины (а первоначально— на стене машинного здания) выбирается тогда вторая неподвижная точка C. Точка B соединяется с C посредством тяги BD и CD, соединенных шарнирно в D. Концы прямой BD, B и D описывают дуги кругов вокруг центров A и C, промежуточные точки прямой BD описывают сложные кривые. Уатту удалось найти, что на прямой BD имеется такая точка E, которая,

[1] Заметим, что известный механик-конструктор Брама (Bramah), о котором мы говорили выше, являлся крайним противником Уатта и доказывал невозможность осуществления его машины. С м а й л ь с. Цит. соч., стр. 167.

при небольших отклонениях балансира от среднего положения, описывает линию весьма мало отличающуюся от прямой. Эту точку E вполне можно соединить непосредственно с штоком поршня или другой частью машины, имеющей прямолинейное движение. Описанный механизм, составленный из трех прямолинейных частей, называется неполным параллелограмом Уатта. Дальнейшие исследования Уатта показали, что можно построить параллелограм $DCFB$, в котором точка C будет лежать на продолжении линии AE; эта точка тоже будет описывать (при известных пределах качания балансира) часть кривой, почти совпадающую с прямой. Такой механизм называется полным параллелограмом Уатта. [1] Механизм этот оказался чрезвычайно приспособленным именно для балансирной



Фиг. 24

машины и вскоре он вытеснил цепные передачи к балансиру даже в водоподъемных машинах простого действия Уатта и в атмосферных машинах, которые продолжали строиться после этого времени.

Изобретение параллелограма свидетельствует о необыкновенной силе геометрической интуиции Уатта. Сам Уатт, вообще очень скромно отзывавшийся о своих изобретениях, писал о параллелограме в одном из позднейших писем к своему сыну так: «хотя я не особенно забочусь о своей славе, однако горжусь изобретением параллелограма, более чем каким-либо из изобретений, которые я сделал.» Французский ученый Прони, который исследовал аналитически параллелограм Уатта, указывает, [2] со слов английского писателя Адамса, [3] будто бы Уатт почерпнул идею своего изобретения из прибора, предложенного итальянцем Суарди (Suardi)[4] для черчения различных кривых и названного им «геометрическим пером».

---

[1] Различные формы параллелограмов Уатта приведены у Тредгольда (французский перевод, стр. 521 и след., табл. XVI).

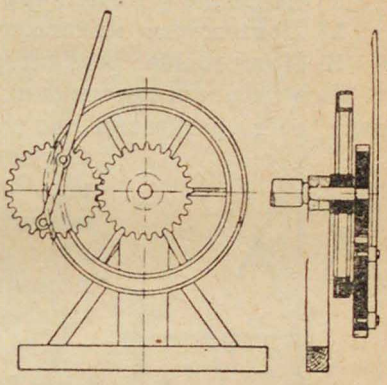
[2] Prony. Nouvelle architecture hydraulique, т. 2, стр. 141 и след.

[3] George Adams. Geometrical and graphical Essais, London, 1791.

[4] J. Suardy. Nuovi strumenti per la descrizzione di diverse curve antiche et moderne, Brescia, 1752.

Однако рисунок этого инструмента, приведенный в книге Прони, [1] совершенно не подтверждает мнения Адамса и Прони: прибор этот может давать, действительно, весьма разнообразные и интересные кривые (некоторые из которых приведены у Прони),[2] но они геометрически совершенно отличны от кривой Уатта, на что справедливо указывает Гашетт (Hachette), который тоже сам много занимался кривой Уатта.[3] В XIX в. параллелограм Уатта сделался объектом для исследования многих математиков, в том числе знаменитого русского ученого П. Л. Чебышева, который вывел условия для таких относительных размеров этого механизма, при которых получается наименьшее отклонение от прямой линии; но к этому времени балансирные машины стали утрачивать свое значение.

Вторая, тоже чисто кинематическая задача, это, как мы говорили, передача движения от второго конца коромысла к валу. Самое простое и естественное решение было бы просто применить для этой передачи механизм шатуна и кривошипа. Но шатунно-кривошипная передача в паровых машинах была охранена ранее взятым (в 1779 и 1780 гг.) патентом Васбру (Wasbrough) и Пикара (Pickard). Хотя их можно было оспаривать, [4] но Уатт предпочел применить другой способ передачи к валу и 25 октября 1781 г. он берет патент на 5 различных способов такой передачи. Из них применение нашло так называемое «планетное и солнечное колесо» («Sun and Planet Gear»). Это есть эпициклическое зацепление с 2 колесами равного диаметра, одно из которых насажено на вал, а другое — прикреплено неподвижно к тяге, идущей от балансира, и совершает оборот вокруг первого колеса (фиг. 25).



Фиг. 25

[1] Prony, цит. соч., фиг. 197.

[2] Некоторые из этих кривых будут VI порядка, как и кривая Уатта, но они принадлежат к тому классу кривых, которых Лориа (Loria. Spezielle ebene Curven. Bd. I, Leipzig, 1910) называет «родонеями»; они принадлежат к другому классу кривых, чем кривая Уатта.

[3] Hachette. Histoire de la machine à vapeur, гл. VI, Paris, 1830. Гашетт дал кривой Уатта название «кривая с длинным перегибом» (courbe à longue inflexion).

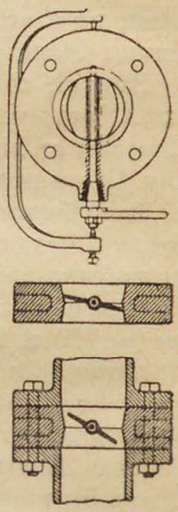
[4] Мы не можем входить в подробности запутанной истории отношений между Васбру, Пикаром и Уаттом. Она изложена по документам в цитированной книге Дикинсона и Дженкинса (стр. 148—158). Самый факт выдачи Пикару патента на применение к паровым машинам столь общеизвестной передачи, как шатунно-кривошипная, в высшей степени удивителен.

Уатт совершенно справедливо писал по этому поводу: «истинный изобретатель кривошипного механизма был человек, создавший обыкновенный токарный станок. Применять его к паровой машине было так же легко, как воспользоваться ножом, предназначенным для резки хлеба, для разрезания сыра».

Теория показывает, что при одном обороте колеса, закрепленного на тяге (т. е. при одном двойном ходе балансира), колесо, закрепленное на валу, должно сделать 2 оборота вместе с валом. Это увеличение числа оборотов вала было для балансирных машин особенно важно, так как балансир не мог делать много качаний в минуту, а, следовательно, и число оборотов главного вала получилось бы при непосредственной передаче очень малым. Поэтому планетная и солнечная передача с успехом применялась Уаттом до срока истечения патента Пикара.

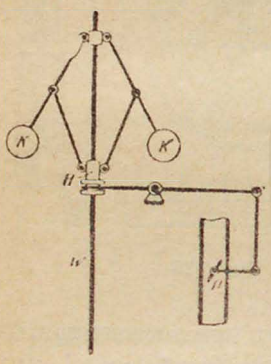
Динамические проблемы, которые встали перед Уаттом при создании машины с непрерывным вращательным движением, были следующие:

1) Введение работы пара с двух сторон поршня.
2) Применение махового колеса.
3) Применение регулятора.



Фиг. 27

Что касается применения в машинах двойного действия, то теоретически оно не является необходимо связанным с применением непрерывного вращательного движения в машине: при достаточно большом маховике можно было бы работать и при впуске пара только с одной стороны, но, конечно, при вращательном движении вала впуск пара с двух сторон поршня создает более равномерное усилие. Машина двойного действия имеет большие преимущества и для насосной машины, так как увеличивает вдвое использование цилиндра. Поэтому, хотя машины эти стали окончательно конструироваться только в 1783 г., первая идея такой машины была высказана Уаттом еще в 1774 или в 1775 г. Патент на машину двойного действия был взят Уаттом в 1784 г. (28 апреля 1784 г., № 1432). В патенте этом перечислялось много усовершенствований, предлагаемых Уаттом, в том числе и передача движения от поршня к балансиру помощью параллелограма (и при помощи других средств, не вошедших в употребление), далее — действие пара с двух сторон цилиндра, применение сдвоенных машин с 2 цилиндрами, далее — тоже неосуществленный проект ротативного парового двигателя и некоторые усовершенствования в паровой машине, о которых мы будем говорить дальше (регулятор, действующий на дроссель-клапан).

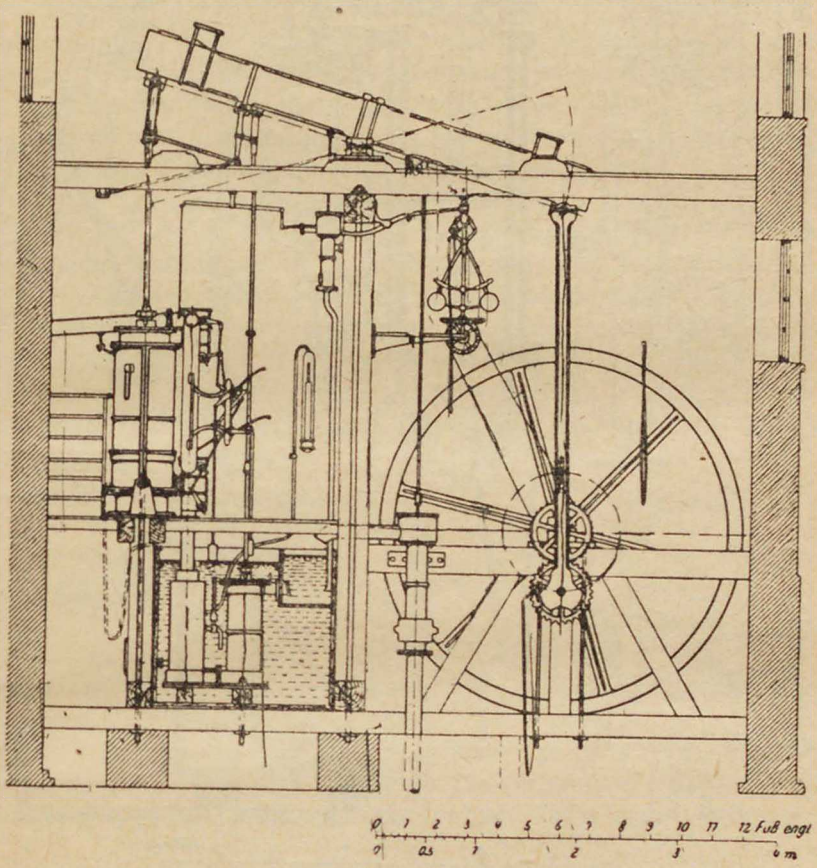


Фиг. 26

Маховое колесо, необходимое для уменьшения колебаний скорости вращения, не было новостью в рассматриваемое время, но каким-то образом применение его в паровых машинах тоже попало в патент Васбру, и Уатту пришлось войти в соглашение с последним для применения махового колеса в своих машинах с непрерывным вращением. Регулятор составляет одно из важнейших и совершенно самостоятельных изобретений

Уатта. Схема центробежного регулятора, соединенного с дроссель-клапаном, изображена на фиг. 26. Действие его следующее:

Ось W вращается вследствие соединения помощью той или иной передачи с машиной. Она приводит во вращение шары K, которые вследствие центробежной силы получают стремление удаляться от оси вращения. Каждому числу оборотов соответствует определенное положение шаров

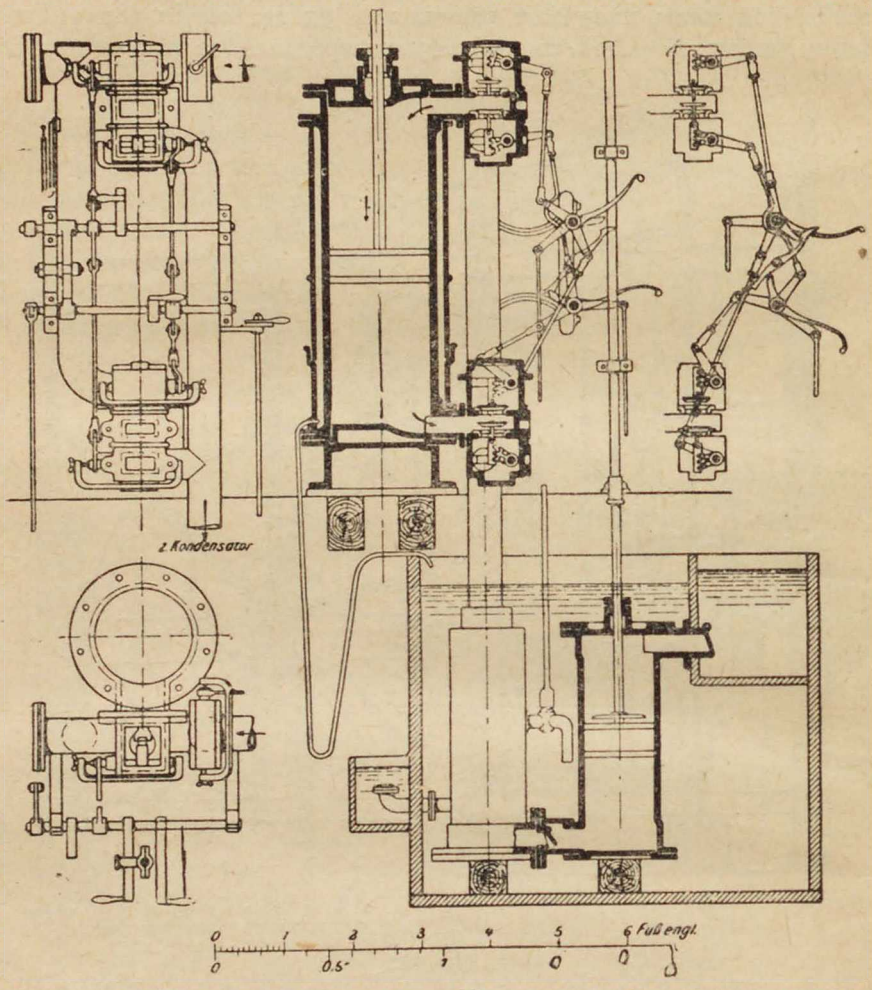


Фиг. 28

регулятора, в котором центробежная сила уравновешивается с их весом. С шаром регулятора соединена муфта H, от которой сделана передача посредством рычага к заслонке D, расположенной внутри паропроводной трубы. Эта заслонка и образовывает дроссель-клапан. Дроссель-клапан изображен отдельно на фиг. 27.

Нормальному числу оборотов машины соответствует некоторое определенное число оборотов шаров вокруг оси регулятора, а, следовательно, и определенное положение шаров и заслонки D, при котором она пропускает пар как раз в таком количестве, которое необходимо, чтобы давать работу в цилиндре для уравновешения полезной нагрузки и вредных

сопротивлений. Если полезная нагрузка машины изменяется, то равновесие в машине нарушается и она начинает вращаться с числом оборотов, большим или меньшим нормального. Вследствие этого изменится и число оборотов шаров регулятора и в нем нарушается равновесие, шары его



Фиг. 29

передвигаются вверх или вниз, вызывая соответственное передвижение муфты и заслонки дроссель-клапана. Перемещение заслонки приводит поступление пара в цилиндре в соответствие с требуемой мощностью. Центробежные регуляторы (устроенные, правда, конструктивно иначе) составляют и в настоящее время необходимую принадлежность всякого двигателя.

Все предложенные усовершенствования позволили Уатту в ближайшие годы выработать нормальный тип машины двойного действия с непрерывным вращательным движением. Тип этот в течение долгого

дальнейшего периода подвергался только частичным изменениям. Машина такого типа изображена на фиг. 28. Разрез по цилиндру и воздушному насосу этой машины изображен на фиг. 29.

На этом же рисунке видно и устройство парораспределительных органов. Образец такой машины имеется в Соут-Кенсингтонском музее.

Распространение машин Уатта. Дальнейшие усовершенствования в них, сделанные Уаттом

Изобретенные Уаттом машины двойного действия с непрерывным вращением (равно как и усовершенствования, внесенные им и в водоподъемную машину простого действия) чрезвычайно содействовали быстрому распространению паровых машин; первая машина с непрерывным вращением (построенная по заказу) была поставлена на заводе Вилькинсона в 1783 г. для приведения в движение кузнечного молота.

В 1784 г. была построена рудоподъемная машина с непрерывным вращательным движением для одной из копей в Корнваллисе, в том же 1784 г. — аналогичная машина для одной лондонской пивоварни, несколько машин построено за эти годы для собственного завода Болтона и Уатта в Сохо и т. д.

За 70 лет (до 1769 г.) производства атмосферных машин их было выпущено, по расчетам Смитона, в общем около 140. Машины эти распределялись следующим образом: [1]

Округ Ньюкестля (угольные копи)	60
Другие угольные копи	10
Корнваллис (медные копи)	30
Лондонские водопроводные устройства	10
Установки для других целей	20
Общее число (приблизительно)	130

Остальные 10 машин частью вывезены за границу, частью неизвестно где поставлены.

Между тем машин Уатта построено было (по точным данным, собранным в той же книге Лорда) [2] с 1775 по 1785 г. включительно 66, с общей мощностью в 1238 л. с. Они распределялись следующим образом:

	Число	Мощность (в л. с.)
Медные копи	22	440
Доменные печи и кузнечные цеха	17	428
Водопроводы	7	93
Угольные копи	5	100
Остальные	15	177
	66	1 238 л. с.

[1] Lord. Capital and Steam Power, стр. 151 и сл. Ср. также сведения о распространении паровых машин в Англии, приведенные у Тредгольда (цитир. франц. перевод, стр. 69 и след.).

[2] Lord. Цит. соч., стр. 151.

В следующие периоды установка паровых машин идет еще более быстрым темпом. Данные для периодов 1785—1795 г. и 1795—1800 г. [1] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Фабрики, заводы и проч.	1785 г.	1795 г.	1795—1800 г.	
	Число	Мощность (в л. с.)	Число	Мощность (в л. с.)
Хлопчатобумажные ткани . .	47	735	35	637
Шерстяные фабрики	—	—	7	120
Установки на каналах	11	152	4	38
» в угольных копях	22	220	3	60
» в мельницах . . .	6	68	1	16
» в доменных и кузнечных цехах	9	150	2	40
Установки на винокуренных заводах	5	114	1	20
Установки на пивоваренных заводах	11	91	5	52
Остальные	33	478	21	313
Итого . . .	144	2 009	79	1 296

К этому перечню машин, поставленных заводом Болтона и Уатта, надо еще прибавить машины, поставленные в Шотландию, Ирландию, Валлис и за границу (во Францию и Испанию).

Таким образом, общее число паровых машин, поставленных в Великобритании и Ирландии к 1800 г., достигает 321 с общим числом лошадиных сил, равным 5 210.

В приведенных цифрах интересно также отметить, что наибольшее распространение паровые машины получили в хлопчатобумажной промышленности (всего в этой отрасли промышленности в Великобритании было поставлено к 1800 г. 84 машины с общей мощностью в 1 382 л. с.

На ряду с этой промышленностью идут по количеству употребляемых машин угольные копи, металлургия железа и меди и обработка железа, дающие в сумме 80 машин с общей мощностью в 1 438 л. с. Из остальных групп сравнительно крупное место занимают еще водопроводы и каналы (31 машина с 502 л. с.).

В каждой из остальных отраслей число поставленных машин сравнительно невелико. Но именно в хлопчатобумажной промышленности, в горном деле и в металлургии и наметились особенно крупные сдвиги, составляющие в совокупности промышленный переворот, в котором паровая машина Уатта является, с одной стороны, заключительным звеном, с другой стороны — фактором, обусловливающим дальнейшее его движение. В 1826 г. в Англии насчитывалось уже до 1 500 паровых машин с общей мощностью около 80 000 л. с. Приведенные цифры характеризуют

[1] Lord. Цит. соч., стр. 166 и след.

значение машины Уатта в процессе экономического переворота. Подробный анализ приведенных фактов, относящихся к машине Уатта, вполне подтверждает отзыв о ней К. Маркса: «только с изобретением второй машины Уатта, так называемой машины двойного действия, был найден первый мотор, который, потребляя воду и уголь, сам производит двигательную силу; который, так как его можно передвигать и сам он служит средством передвижения, является городским, а не деревенским двигателем, подобно водяному колесу, позволяет концентрировать производство в городах, вместо того, чтобы рассеивать его в деревне, универсален по своему техническому применению и сравнительно мало зависит в своем местопребывании от тех или иных местных условий. Великий гений Уатта обнаруживается в том, что патент, взятый им в апреле 1784 г., давая подробное описание паровой машины, изображает ее не как изобретение для особых целей, а как универсальный двигатель для крупной промышленности».

Мы упоминали уже о машинах, изготовленных на заводе Уатта и Болтона для вывоза за границу. В скором времени во многих странах возникает свое производство паровых машин. Так, во Франции производство их начато Перье (Perier) в Париже уже около 1780 г. [1] К началу 20-х годов XIX столетия во Франции открывается уже несколько заводов для изготовления паровых машин и, кроме того, они продолжали ввозиться из Англии, так что к 1826 г., по подсчету статистика Мюльгаля, во Франции насчитывалось уже около 300 паровых машин.[2] В Бельгии введение постройки паровых машин связано с именем Коккериля и его знаменитым заводом в Серенге (близ Льежа), в котором постройка паровых машин начата около 1818 г. В Германии паровая машина распространяется сначала медленно (что связано с общей отсталостью ее экономической жизни), но уже в конце XVIII столетия постройкой паровых машин начинает заниматься Бюклинг (Bückling), а в начале XIX столетия — Диннендаль (Dinnendal). [3]

В Соединенных Штатах главным деятелем по введению паровой машины явился Эванс (Oliver Evans), который стал строить свои машины высокого давления около 1800 г. [4] Затем постройкой паровых машин занялись и другие выдающиеся машиностроители: Стэвенс, Тэрстон, Бабкок и др.

---

[1] Машина Перье (Perier) двойного действия, изготовленная частично на его заводе на Лебяжьем острове в Париже, подробно описана у Прони «Nouvelle architecture hydraulique, т. II, стр. 35 и след.

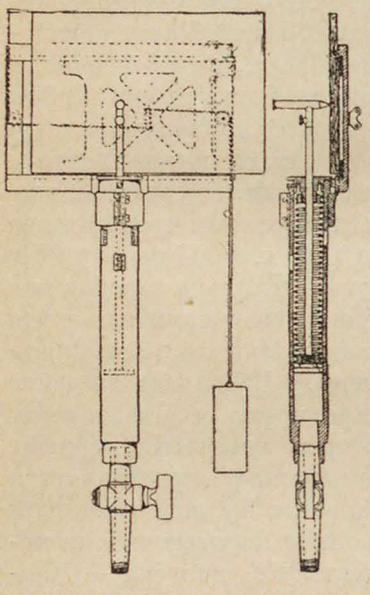
[2] Подробные данные о распределении паровых машин во Франции в 1833 г. приведены во французском переводе сочинения Тредгольда (Tredgold. Traité de machines à vapeur, Bruxelle, 1838, стр. 71). По указанию этого сочинения в 1833 г. было действующих машин во Франции 946 с общей мощностью в 1451 л. с. Из них уже 759 машин были построены на французских заводах.

[3] Деятельность Бюклинга и Диннендаля описана подробно у Матчоса (цит. соч., стр. 149 и след).

[4] О деятельности Эванса, связанной с производством машин высокого давления, мы будем говорить дальше.

Сравнительно рано началась постройка паровых машин Уатта в России. Уже в конце XVIII в. приглашается для постройки их шотландец Гаскоин, служивший раньше на Карронском заводе Ребэка. Специально же занялся постройкой паровых машин завод, основанный в Петербурге (около 1800 г.) другим шотландцем, Карлом Бердом, долго носивший имя последнего (впоследствии перешедший к акционерной компании и называвшийся «Франко-Русским заводом»). [1]

Так, в 1817 г. заводом Берда были построены машины для Тульского оружейного завода, а в 1817 г. — для Варшавского арсенала. До 1825 г. заводом Берда было уже выпущено до 130 стационарных паровых машин и кроме того 11 пароходов. [2]



Фиг. 30

Нам остается еще сказать несколько слов о деятельности Уатта после 1784 г. Изобретения его в этом дальнейшем периоде уже не играют большой роли. Здесь действует опасение, чтобы достигнутые успехи не были подорваны неудачами, связанными с новыми предложениями. В 1785 г. он сам пишет Болтону: «я нахожу, что сейчас пора уже прекратить опыты новых изобретений, в особенности не следует ничего пробовать, что сопряжено с какой-либо опасностью неудачи или может причинить нам затруднения при исполнении. Будем в дальнейшем изготовлять те вещи, которые мы умеем делать, и предоставим остальное молодым людям, которым не грозит потеря ни денег, ни имени». Поэтому Уатт вводит в употребление в этом периоде только несколько приборов: ртутный открытый манометр (удобный при низких давлениях Уаттовских машин), ртутный вакуумметр в конденсаторе, водомерное стекло в котлах. Кроме того, он сконструировал простейшей формы индикатор, т. е. прибор, служащий для съемки индикаторных диаграмм. Индикатор Уатта изображен на фиг. 30.

Перемещения листа бумаги дают положения поршня машины; давление же в этом положении измеряется величиной сжатия пружины, связанной с поршнем, который движется в цилиндре индикатора. Этот последний ставится на цилиндр машины и соединяется с ним помощью крана. Карандаш, связанный с поршнем индикатора, чертит на бумаге кривую, изображающую связь между давлением пара и положением поршня. Прибор этот (в измененной конструкции) сделался скоро необходимым инструментом для рационального ухода за паровой машиной и для испытания паровых машин, а позже — и двигателей внутреннего сгорания и

[1] Ныне завод имени тов. Марти.

[2] А. А. Брандт. Цит. соч., стр. 38.

поршневых машин-орудий (насосов, компрессоров). В этом периоде Уатт берет только один патент (№ 1485 в 1785 г.) на усовершенствованные методы постройки топок и печей, служащих для нагревания всяких жидкостей с улучшением в них действия топлива и с предупреждением образования дыма.

Деятельность Уатта в этом периоде сосредотачивается на улучшении производства машин на заводе в Сохо, на коммерческих отношениях с заказчиками и на борьбе с конкурентами, оспаривающими или просто нарушающими права патентов Уатта. В 90-х годах XVIII столетия и эта деятельность заметно ослабляется, и Уатт переходит к другим мелким изобретениям, занятию разными науками и литературой . В 1800 г. истек срок главных патентов Уатта, и он (а также и Болтон) удаляется вовсе от дел. Уатт скончался 19 августа 1819 г.

Организация производства паровых машин на заводе Болтона и Уатта. Испытание установленных паровых машин Уатта и использование в них тепла

Деятельность Болтона и Уатта имела значение не только в области усовершенствования конструкции паровой машины: завод Болтона явился первым примером специализированного машиностроительного завода с стремлением к возможно точному производству. Этой возможно совершенной по тому времени технологической постановке производства машины Уатта обязаны в значительной степени своим успехом. Эта правильная организация производства явилась делом, главным образом, Болтона, причем были выработаны также правила производства некоторых частей паровых машин на других заводах.[1] Так же внимательно отнеслись Болтон и Уатт к вопросам монтажа и правилам эксплоатации паровых машин. В 1779 г. была выработана инструкция по сборке машины, [2] причем подробно разработан порядок установки каждой отдельной части машины (с приведением ее изображения), а затем дается подробное объяснение действия каждой части. В 1784 г. вырабатывается инструкция по уходу за машиной с непрерывным вращательным движением.[3] Эти правила были тем более необходимы, что уход за машиной был довольно сложен и требовал опытного машиниста. Для правильного назначения размеров в частях своих машин Уатт выработал ряд практических формул, пригодных, конечно, только для соотношений, принятых в Уаттовских машинах, но долгое время считавшихся за неизменные правила. Как примеры таких правил можно привести следующее. [4]

«Как найти количество воды, испаряемое в котлах для машины Уатта?»

---

[1] Дикинсон и Дженкинс. Цит. соч., гл. XX.

[2] Дикинсон и Дженкинс. Цит. соч., приложение II («Directions for erecting and working the newly invented steam engine»).

[3] Дикинсон и Дженкинс. Цит.соч., приложение III («Directions for working rotative engines»).

[4] C. Matschoss. Цит. соч., 1, стр. 369—370.

Правило: Умножить квадрат диаметра цилиндра на путь, проходимый поршнем в минуту в футах, и разделить полученное произведение на 288 000; частное дает количество воды, испаряемое в минуту в кубических футах.

Эта формула может быть выведена, если сделать предположение, что 1 дм^3 воды занимает при испарении объем приблизительно равный 1 фут^3 и считать еще, что в цилиндре имеется вредное пространство, равное 8—10% полезного объема цилиндра. При других предположениях формула эта делается неверной. Однако эти формулы служили только для расчетов, предназначенных для собственного употребления. К этой же категории относятся эмпирические правила для предсказания расхода угля вроде следующего (предложенного Болтоном): «расход угля на 1 800 ходов машины равен произведению из объема цилиндра в кубических футах на давление на поршень в фунтах на квадратный дюйм». В других правилах давалась зависимость расхода угля на 1 дм диаметра поршня или на 1 дм длины окружности поршня. Конечно, такие правила вообще могут иметь только очень ограниченную применимость.

Что касается испытания машин, то прежде всего их надо было организовать для водоподъемной машины, так как в первые годы своей деятельности, при замене атмосферных машин своими, Уатт заключал условие, по которому, вместо уплаты за машину, Уатт получал одну треть сбережения угля, даваемого его машиной по сравнению с атмосферной в течение 25 лет. [1] Сбережение, даваемое машинами Уатта, было велико. Так, уже в 1778—1779 г. по опытам Смитона, произведенным с одной из водоподъемных машин Уатта, дали работу в поднятой воде, равную 18 000 000 фунто-футов на один бушель (=84 фунта=38,1 кг) сожженного угля; это дает работу в 65 312 кгм на 1 кг сожженного угля. Другая водоподъемная машина, особенно больших размеров: диаметр был равен 58 дм (1 473 мм), ход поршня 8 футов (2,44 м), число двойных ходов в минуту —12, мощность около 76 л. с., тоже испытанная в 1779 г. Смитоном, дала работу в 19 000 000 фунто-футов на один бушель сожженного угля, т. е. 68 940 кгм на 1 кг сожженного угля. Мы видели, что атмосферные машины в среднем давали около 20 000 кгм на 1 кг сожженого угля. Таким образом уже в эти годы машина Уатта показала свое большое преимущество над атмосферными машинами, давая расход угля в 3—3,5 раза меньше, чем последние. В более поздних водоподъемных машинах Уатт принимал работу, равную 23 440 000 фунто-футам на один бушель угля, т. е. 85 050 кгм на 1 кг сожженного угля. Этот результат является в 4 раза более благоприятным, чем у атмосферных машин. Наилучшие результаты, полученные с водоподъемными машинами в Корнваллисе в 1792 г., — работа в 33 000 000 фунто-футов на центнер (=12 фунтам) сожженого угля, [2] что дает 25 000 000 фунто-футов на 1 бушель (=84 фунта) т. е. около 91 000 кгм на 1 кг сожженного угля. Если даже сделать оговорки насчет неточности производимых

[1] Дикинсон и Дженкинс. Цит. соч., гл. XXIV.
[2] Дикинсон и Дженкинс. Цит. соч., гл. XXV.

опытов: количество сожженого угля проводится в разных мерах (1 ц брался равным то 112 фунтам, то 120 фунтам; вес бушеля колеблется между 84 и 91 фунтами; применялись и другие, еще более неопределенные меры объема), все же преимущество водоподъемных машин Уатта над атмосферными так велико, что вполне объясняет быстрое вытеснение последних. С введением машины с непрерывным вращением, применяемым для приведения в движение машин-орудий на фабриках и заводах, прежняя оценка машин в весе поднятой воды сделалась непригодной и Уатт занялся выработкой единицы мощности. В этом вопросе естественнее всего было выбрать за единицу измерения такую, которая допускала бы простое сравнение с наиболее часто применявшимися до тех пор двигателями. В 1784 г. Уатт произвел поэтому опыты с работой лошадей на конном приводе. Для целей Уатта было важно взять именно максимальную мощность, которую может дать самая сильная лошадь в течение короткого времени. За такую мощность Уатт взял 33 000 фунто-футов в минуту. Он назвал ее «лошадиной силой» («Horse Power», обозначение —HP); на самом деле даже сильные лошади не могут работать длительно с такой мощностью.[1] Уатт не был первым, сравнивавшим мощность паровой машины с мощностью лошади; этим сравнением занимались уже Сэвери и Смитон. Последний предлагал за единицу мощности взять 22 000 фунто-футов в минуту, но всеобщее признание нашло все же предложение Уатта. При перевычислении в метрические меры и с отнесением к секунде 33 000 фунто-футов в минуту дают около 76 кгм/сек; французские авторы округлили это число до 75 кгм/сек. и назвали «паровой лошадью» («Cheval à vapeur»); это значение лошадиной силы и удержалось в странах с метрической системой мер. Обозначения лошадиной силы приняты следующие: немецкое —PS («Pferdestärke»), французское — cv («Cheval à vapeur»), русское — л. с. Английская лошадиная сила получается таким образом несколько больше, чем метрическая: 1HP=1,0139 л. с.

Относительно потребления угля в машинах Уатта с непрерывным вращением приводятся такие данные: для машины, работающей без расширения, расход угля на 1 л. с. ч. получался в среднем около 8,4 англ. фунт. (т. е. =3,81 кг), для машины с расширением пара в 1½ раза против объема впуска — около 6,26 англ. фунт (2,84 кг) на л. с. ч. Если принять теплотворную способность угля равной 8000 кал/кг, то получим наилучшее использование тепла в машинах Уатта.

В водоподъемной машине . . . . . $\frac{91\,000 \cdot 100}{8\,000 \cdot 427} = 2{,}7\%$

В машинах с непрерывным вращательным движением $\frac{75 \cdot 10 \cdot 60 \cdot 100}{247 \cdot 284 \cdot 8000} = 2{,}8\%$

Машины Уатта с вращательным движением были более или менее нормализированы. Они делились на 2 группы: 1-я, от 4 до 30 л. с. с ходом поршня от 0,91 до 1,83 м, строилась целиком на особой

[1] Данные о работе и мощности лошадей чрезвычайно колеблются у различных авторов, но в общем для нормальной работы без чрезмерного напряжения даются значения, гораздо меньшие лошадиной силы.

деревянной раме; машины 2-й группы (от 36 до 100 л. с. с ходом поршня от 1,83 до 2,74 м) строились с применением стен здания как опоры для балансира.

Главные размеры для машин от 10 до 50 л. с. приведены в табл. 2 (сохраняем в ней только метрические меры).

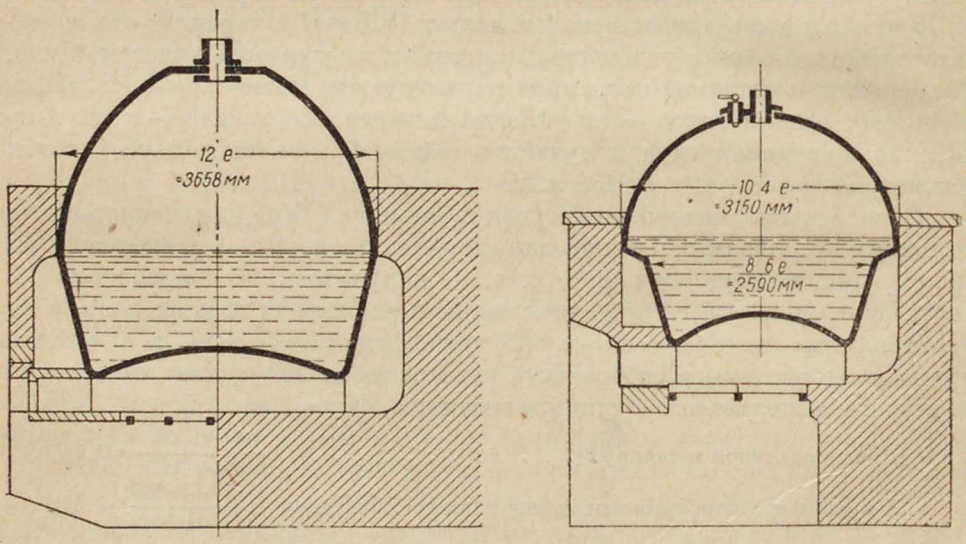
Таблица 2

Заводские машины Уатта

Год	Мощность (л. с.)	Диам. цил. (в мм)	Ход поршня (в мм)	Число обор. (в мин.)	Скор. поршня (м/сек.)	Диам. вод. нас. (в мм)	Ход возд. нас. (в мм)	Маховое колесо	
								Число обор.	Вес в кг
1786/1789 . .	50	864	2 440	16	1,3	457	1 220	—	10 890
1792	20	610	1 520	21	1,06	381	760	42	4 770
1792	40	800	2 130	$17^1/_2$	1,26	533	910	35	7 623
1795	10	444	1 220	25	1,02	305	610	$48^1/_2$	1 557
1798	30	718	1 830	19	1,16	483	910	38	4 815

Паровые котлы атмосферных машин, машин Уатта и его современников

Паровые котлы первых паровых машин Папина и Сэвери делались из меди и имели форму шара, как тогдашние котлы для варки пищи.



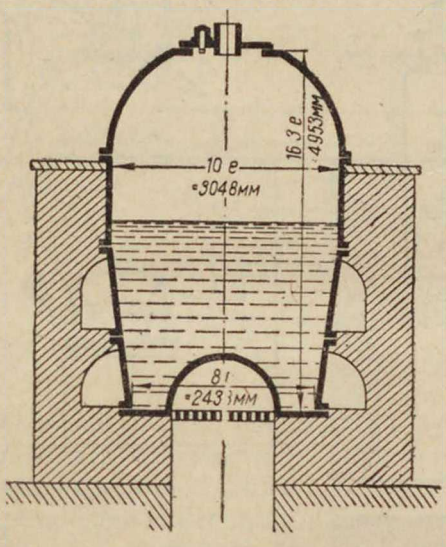
Фиг. 31а и б

Так как размеры самих машин, а также и котлов были очень невелики, то изготовление их и поддержание плотности в соединениях не представляло особенно больших затруднений. Но отсутствие всей нужной арматуры (предохранительные клапаны и водомерные краны были

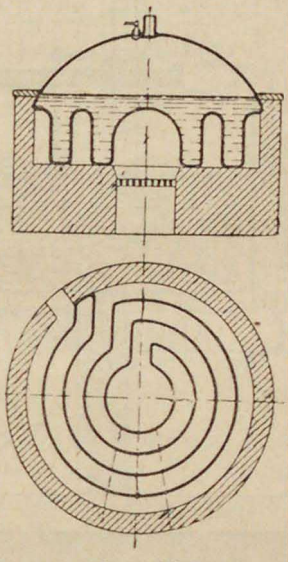
введены несколько позже) вызывало при сравнительно высоком давлении этих котлов все же известные опасности в обращении с ними.

Котлы Ньюкоменовских машин сохраняли тоже форму тел вращения, но вызывали большие затруднения в осуществлении вследствие своих значительных размеров. Различные употреблявшиеся формы этих котлов показаны на фиг. 31 а и б.

Они изготовлялись первоначально тоже из меди, но по мере увеличения размеров цена медных котлов стала слишком значительной, и пришлось перейти к другим материалам, сначала чугуну, а затем — листовому железу.



Фиг. 32



Фиг. 33

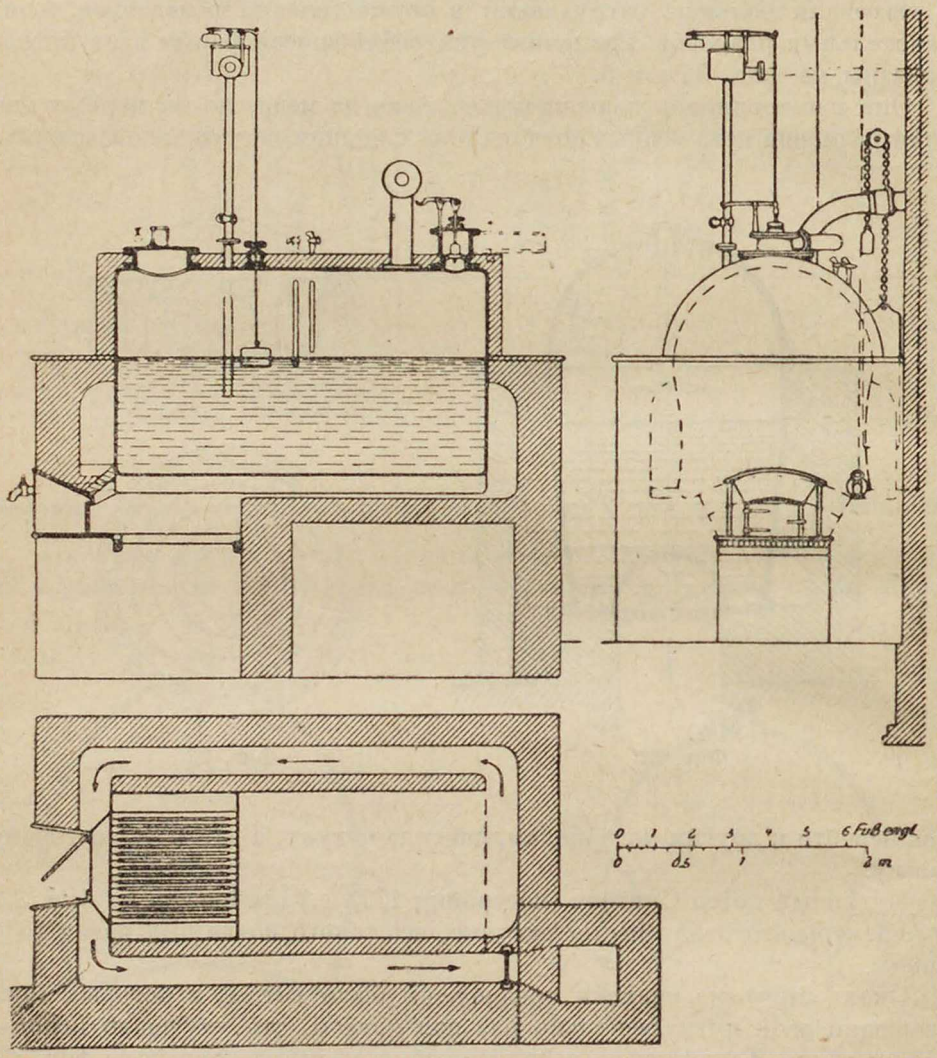
Чугунный котел Смитона (постройки 1773 г.) изображен на фиг. 32. Размеры его показаны на рисунке, вес такого котла был равен 15½ тоннам.

Около этого же времени предложены были котлы, в которых газы совершали свой путь несколько раз под котлом, что улучшало использование тепла. Такой котел (исполненный из меди) изображен на фиг. 33.

Машины Уатта с их большой мощностью потребовали котлов другой формы, изготовленных из железных листов. Уатт придал своим котлам форму сундука с круглым верхом, первоначально с прямыми боковыми стенками, а затем — с изогнутыми боковыми стенками, что увеличило их сопротивляемость. Такой котел изображен на фиг. 34.

Большие трудности представляла клепка этих котлов в виду большого количества склепываемых листов (вследствие малого размера изготовляемых листов). Очень трудно было также обеспечить надлежащую плотность соединений.

Очень рано стали также применяться котлы с жаровыми трубами. Первые попытки устройства таких котлов сделаны были даже для атмосферных машин с низким давлением пара, причем за материал для тела

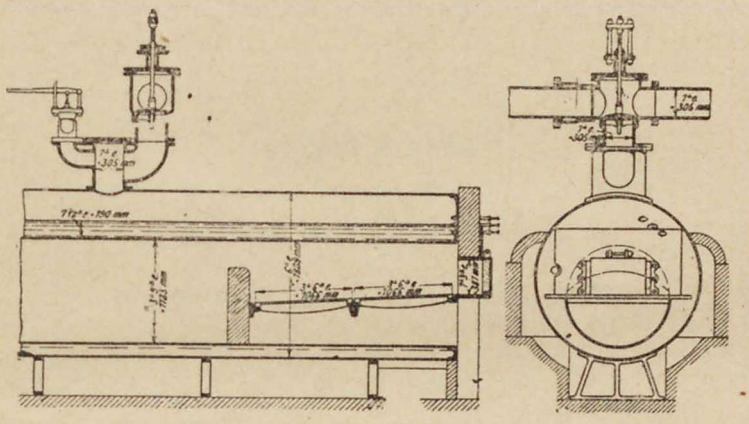


Фиг. 34

самого котла применялся камень (проект инженера Бриндлея — 1756 г.) и даже дерево: самая топка при этом делалась внутренняя и исполнялась из железных листов; эта топка непосредственно соединялась с железными же внутренними жаровыми трубами.

Но вскоре при переходе к машинам высокого давления (предлагавшимся Тревитиком и Эвансом) пришлось перейти к котлам цилиндрической формы как более надежным в отношении сопротивления давлению.

Очень скоро стали применяться цилиндрические котлы с внутренней топкой жаровой трубой. Такие котлы стал строить Эванс в Америке уже в 1786 г.; в Европе же их ввел в употребление Тревитик, прежде всего в копях в Корнваллисе; отсюда произошло их название «Корнваллийские котлы». В виду больших размеров этих котлов их уже нельзя было строить чугунными, и пришлось перейти окончательно к железным листам, причем трудности с уплотнениями продолжались: котельные листы имели



Фиг. 35

самый большой размер, равный 3×1 фут (0,9×0,3 м), и потому приходилось применять большое число заклепочных швов. Между тем пробивание дыр делалось не точно, дыры в листах не приходились друг против друга и самые заклепки плохо пригонялись к металлу. Таким образом плотность поддерживалась помощью обильного употребления сурика и других уплотняющих масс, которые непрочно держались на металле, в результате чего получалось сильное парение.

Все же около 1815 г. Тревитику удалось более или менее преодолеть эти трудности и корнваллийские котлы получили большое распространение. Корнваллийский котел более позднего времени (около 1830 г.) изображен на фиг. 35.

Тревитик делал также попытки создания первых водотрубных котлов, которые, однако, не получили в то время развития.

ВТОРОЙ ПЕРИОД

ТЕПЛОТЕХНИКА

В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВЕКА

Глава I

ПЕРВЫЕ ПАРОХОДНЫЕ МАШИНЫ

Ранние попытки создания парохода

Применение силы пара к движению пароходов имеет, так же как и обыкновенная паровая машина, большое количество ранних предложений, по большей части сделанных в очень неопределенной форме и не получивших осуществления. В обсуждении же вопроса о первенстве в деле создания парохода тоже играли роль различные национальные пристрастия, и в нем трудно с точностью разобраться. [1] Но простое соображение о крайней сомнительности устройства парохода до осуществления паровой машины делает мало вероятным многие утверждения старых писателей о ранних изобретениях парохода.

В новейшей литературе большинству этих ранних попыток придается чрезвычайно малое значение.

Мы упоминали уже о совершенно фантастическом мнении, приписывающем испанцу Бласко де-Горе (в 1543 г.) первые опыты с паровой машиной вообще и с применением ее для передвижения судов в частности. Позднейшие изобретатели, работавшие над паровой машиной, маркиз Ворчестер и Сэвери, писали о возможности применения силы пара к движению судов, но не облекали своих предложений в конкретные формы и во всяком случае не осуществляли их. Чрезвычайно распространено мнение о постройке первого парохода Папиным. Многими писателями сообщается, что в 1707 г. он сделал на нем поездку по р. Везеру, но в Миндене был задержан хлопотами по получению пропуска для дальнейшего следования и пароход его был разрушен судовщиками. [2] Для объяснения предполагаемого устройства судна Папина, авторы, защищающие это мнение, предполагают, что движение судна производилось колесом с лопатками, которые были связаны с устройством, рекомендованным Папиным

---

[1] Одна из крайне рекомендуемых работ по истории создания парохода принадлежит русскому академику Гамелю. H a m e l. Rückblick auf die Einführung der Dampfschiffahrt in Europa, «Allgemeine Bauzeitung», стр. 87, 1866 г. Работа эта не была мне доступна и я пользуюсь выдержками из нее у R ü h l m a n n. Allgemeine Maschinenlehre, т. IV.

[2] Эта версия принята, например, у Тэрстона (цит. соч., 2 ч., стр. 4). Rühlmann. Allgemeine Maschinenlehre, т. IV, стр. 72 и др.

именно с его машиной высокого давления, которая накачивала воду в верхний резервуар, откуда она должна была поступить на верхнее наливное колесо. [1] Для мнения этого нет решительно никаких оснований; нет даже документов, которые бы говорили о том, что в судне Папина (несомненно сооруженном) применялся вообще какой-либо паровой двигатель. В письме Лейбница от 13 июля 1707 г., в котором он ходатайствует о предоставлении Папину пропуска на проезд вниз по р. Везеру до Бремена, [2] говорится только об «особенно изобретенном» судне («ein Schiff von sonderbarer Invention»).

Предположение о том, что Папин применил для передвижения своего судна паровой двигатель, опровергается письмом самого Папина к Лейбницу (от 13 марта 1704 г. — период постройки судна, [3] в котором говорится, что Папин не предполагает передвигать это судно помощью паровой машины, так как он «не хочет предпринимать слишком много вещей сразу» («je n'ai point préparé celui pour y emploier la force du feu parce que ce n'est pas à moi d'entreprendre trop de choses à la fois».)

Невозможность предполагаемого устройства передачей через водяное колесо ясна, как нам кажется, и из технических соображений: верхнее наливное колесо требовало бы для сколько нибудь достаточной мощности большой высоты и самая ось его тоже должна была бы быть на большой высоте, что при небольших предполагаемых размерах судна Папина делало бы помещение всего этого устройства на судне прямо невозможным. Повидимому, дело шло у Папина о приведении во вращение гребного колеса простой силой людей.

Создание парохода в начале XIX века

В XVIII в. был сделан целый ряд предложений применения силы пара к движению судов. Большинство из них тоже не носили конкретного характера и не повели даже к попыткам осуществления. К числу более разработанных, хотя и неосуществленных попыток принадлежит предложение Гулля (Jonathan Hull) — английский патент 21 декабря 1736 г. Предложение это сводится к соединению вертикального цилиндра атмосферной машины с осью гребного колеса помощью канатной передачи на два шкива (чем обеспечивалось непрерывное вращение в одну сторону гребного колеса) (фиг. 36).

Около этого же времени (1738 г.) Даниил Бернулли предлагал устроить реактивное судно, в котором движение достигалось бы вследствие реакции воды, выпускаемой из задней части судна ниже уровня воды, по которой плывет судно. Около 1756 г. предложение паровых судов делал во

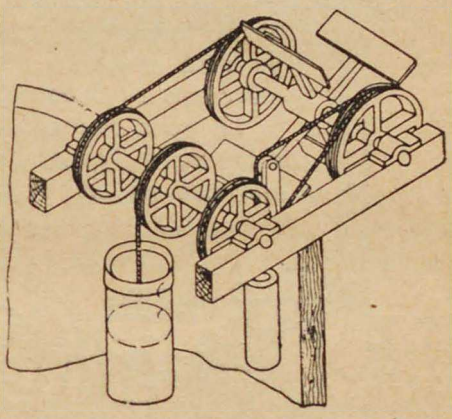
[1] Например, Тредгольд, цит. соч., 2 ч., стр. 4.

[2] Приведенном у Рюльмана, цит. соч., т. IV, стр. 72.

[3] Приведено у Matschoss. Entwicklung u. s. w., т. I., стр. 69. Письмо это обнародовано впервые Gerland в книге «Leibniz und Huygens Briefwechsel mit Papin nebst Biographie Papin's», Berlin, 1881. См. также статью Gerland в «Zeitschr. d. VDI», 177, стр. 462, 1876.

Франции аббат Готье (Gauthier). К концу XVIII в. опыты с применением пара к движению судов приобретают более конкретный характер. Так, во Франции эти опыты делались инженерами Оксироном (Auxiron — 1774 г.), Перье (Perier — 1775 г.), но опыты эти не были удачны. Большее значение придается опытам маркиза Клода Жуффруа (Claude Jouffroy), производившимся в 1783 г. с паровым судном на р. Сене. Он испрашивал многолетнюю привилегию на устройство и эксплоатацию паровых судов во Франции и привилегия на 15 лет была ему обещана при условии успешного производства опытов с паровым судном на Сене возле Парижа; эти опыты успеха не имели и дальнейшего развития его предприятие не получило.

С развитием паровых машин в Англии и Соединенных Штатах сделано было тоже несколько более успешных попыток применения силы пара к движению судов. В особенности сильно это движение обозначалось в Соединенных Штатах с их огромными реками, которые не могли быть хорошо обслужены при прежних способах приведения в движение судов: в речном судоходстве даже применение парусов имеет ограниченное значение, применение силы животных тоже представляет большие неудобства и сравнительно редко осуществляется (гидравлические двигатели, конечно, вовсе не применимы) и таким образом приходилось часто прибегать просто к силе людей (если движение производилось против течения).



Фиг. 36

Для удовлетворения потребности в судовом паровом двигателе в конце XVIII и начале XIX вв. в Соединенных Штатах делается ряд попыток, подготовивших почву для окончательного решения задачи о паровом водном транспорте. [1]

В 1774 г. произведены были опыты с паровым судном Румзея (Rumsey), осуществлявшем идею Д. Бернулли о применении реакции воды, выкачиваемой насосом, для движения судна. Затем он пытался осуществить свое судно в Англии, но во время приготовления к опытам умер (в 1793 г.).

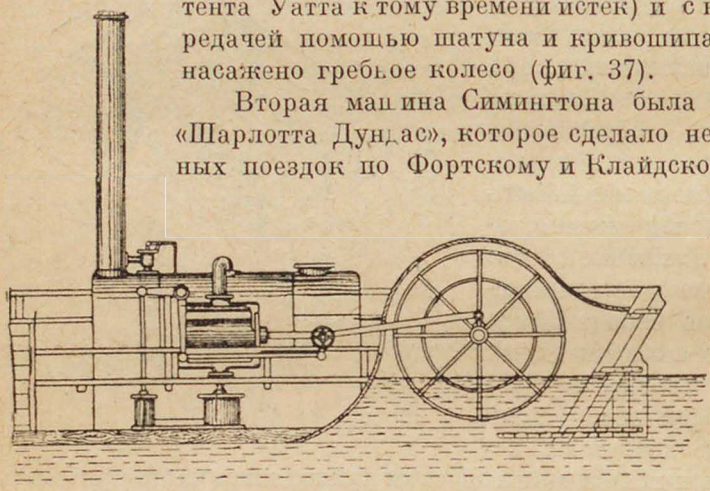
Около того же времени (1785 г.) началась деятельность Джона Фитча (John Fitch). В 1786—1787 гг. ему удалось получить патенты в нескольких штатах; он приступил к осуществлению своих планов и в 1787 г. произвел пробу своего судна. Затем он внес в него некоторые усовершенствования, применил поверхностный конденсатор, особый паровой котел с водяными трубами и др. В 1788 г. он построил другое судно, сделавшее ряд поездок. Оба эти судна Фитча имели паровую машину, приводящую

[1] Этот период подробно и хорошо изложен у Тэрстона. Цит. соч., ч. II, стр. 16 и след.

в движение систему весел, помещенных в первом судне — сбоку, а во втором — сзади за кормой. В 1796 г. он пробовал устроить винтовое паровое судно, но опыты эти не были доведены до конца, так как в 1798 г. он умер.

В этот же период появился ряд изобретателей в Англии, работавших над проблемой парового судна.

Первым из них был Симингтон (William Symington), работавший вместе с лордом Дундасом (Dundas). Симингтону принадлежит несколько конструкций: одна (1787 г.) — с атмосферной машиной, но с отдельным конденсатором (почему она подпадала под действие патента Уатта), другая (1801 г.) — с горизонтальной машиной двойного действия (срок патента Уатта к тому времени истек) и с непосредственной передачей помощью шатуна и кривошипа к валу, на котором насажено гребное колесо (фиг. 37).



Фиг. 37

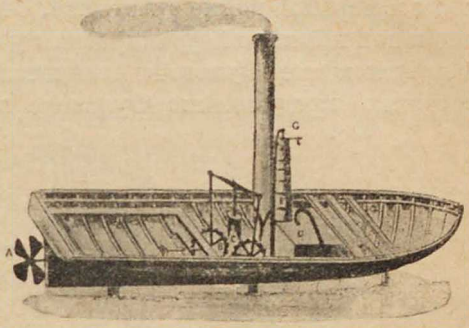
Вторая машина Симингтона была поставлена на судне «Шарлотта Дундас», которое сделало несколько очень удачных поездок по Фортскому и Клайдскому каналу, но затем намеченная постройка других судов такого же типа не была осуществлена и сама «Шарлотта Дундас» осталась стоять без употребления.

По образцу этого судна было построено судно «Комета» Белля (Henry Bell) в 1812 г. Это судно делало регулярные рейсы от Гринока до Гласго и много содействовало последующему распространению пароходов в Англии. Однако, толчок к окончательному созданию парохода был дан из Соединенных Штатов, где в начале XIX столетия над этой задачей работает целый ряд изобретателей: Рузевельт (Roosevelt), Ливингстон (Livingston), Стевенс (John Stevens), Эванс (Oliver Evans) и Роберт Фультон (Robert Fulton). Из них наибольшее значение имеют Стевенс и Фультон. Стевенс занимался вопросом о создании парохода еще с 1789 г., но построил свой пароход он в 1804 г., причем в пароходе этом осуществил много интересных технических идей: водотрубный котел, гребные винты. [1] Модель этого парохода сохраняется в Стевенском технологическом институте (см. фиг. 38).

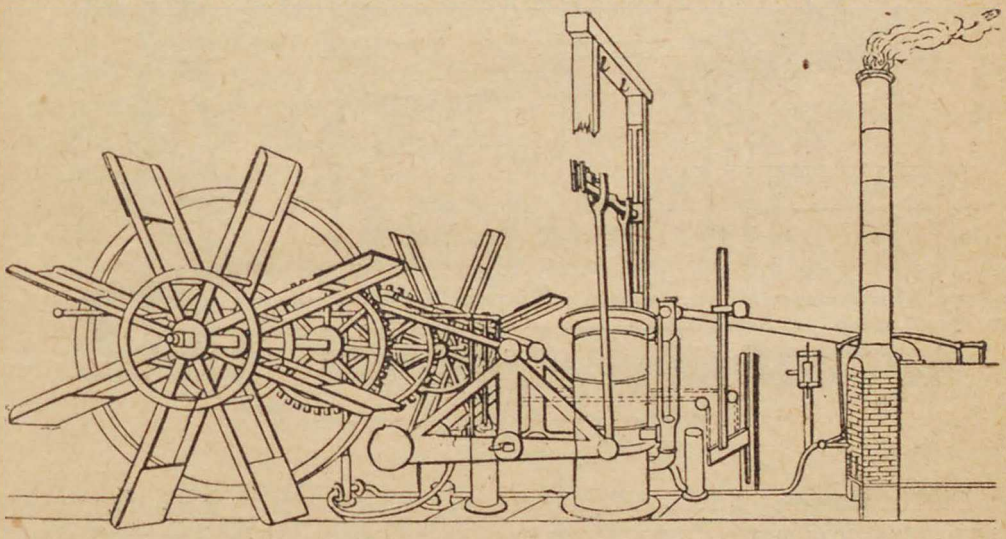
В дальнейшем сам Джон Стевенс и его сыновья занялись постройкой пароходов и имели большое влияние на распространение пароходства

[1] Применение в разработанном виде и в широких размерах гребных винтов к пароходам относится к значительно более поздней эпохе (1836—1840 гг.) и связано с именами Смита (Smith) и Эриксона (Ericsson).

в Соединенных Штатах, но, однако, более успеха имели сделанные одновременно с ними предложения Роберта Фультона, с именем которого обыкновенно связывается окончательное решение проблемы создания парохода. Фультон родился в 1767 г. в Пенсильвании, где работал сначала у золотых дел мастера, а затем стал учиться рисованию, желая сделаться художником. В 1786 г. ему удалось поехать в Лондон для продолжения своего образования. Там он оставил свои занятия рисованием (убедившись в отсутствии у него выдающихся художественных талантов) и занялся механикой и техническими предметами. Из Англии он переехал в Париж, где находился в общении со многими выдающимися французскими учеными и инженерами. В это время Фультон сделал ряд изобретений, между прочим, предложил в 1801 году устройство торпеды и подводной мины для



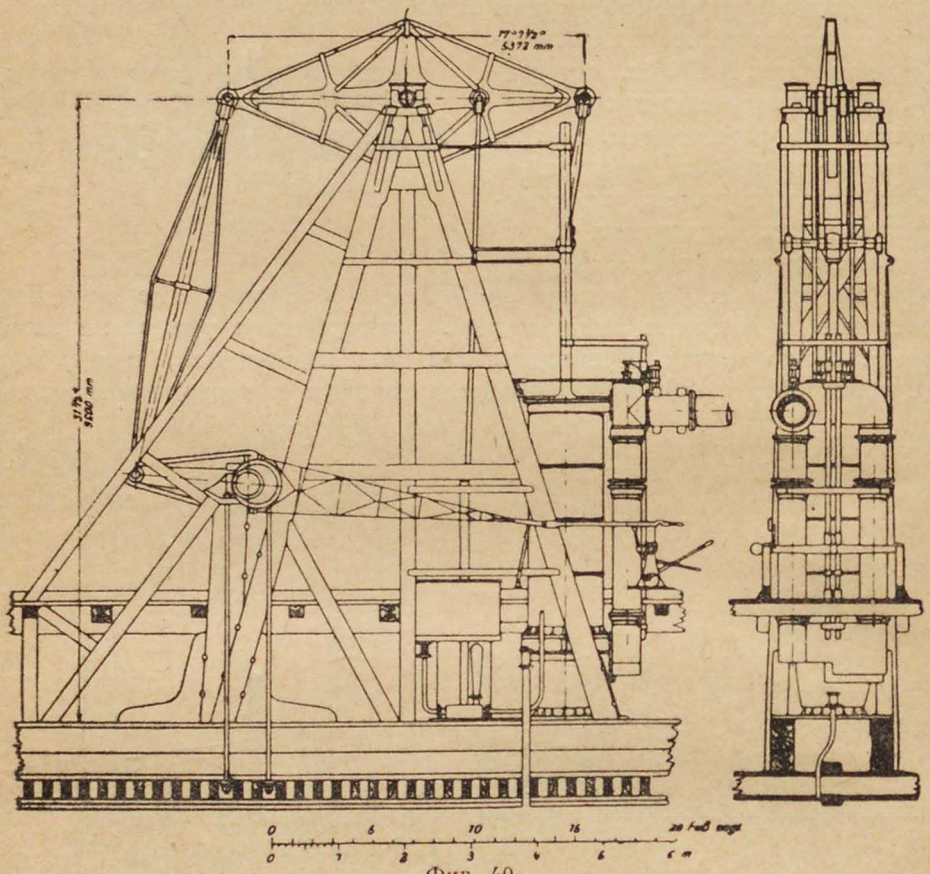
Фиг. 38



Фиг. 39

взрывания судов, которая обратила на себя большое внимание Наполеона, но не нашла особенного применения в его войне с Англией. В этом же году Фультон знакомится с Ливингстоном, назначенным посланником США в Париж. Ливингстон, сам занимавшийся в Америке разработкой проекта парохода, обратил внимание Фультона на этот вопрос. Фультон занялся сооружением парохода, и в 1803 г. ему удалось закончить его постройку и произвести испытание на Сене, впрочем,

скорость парохода оказалась недостаточной и опыты пришлось продолжать дальше. В том же году Фультон предложил Наполеону применить пароходы к морской войне с Англией. Это предложение было рассмотрено специальной комиссией французских ученых, но успеха не имело, так же как и предложение Фультона относительно торпед. Также мало сочувствия встретило предложение Фультона в Англии, куда он снова отправился



Фиг. 40

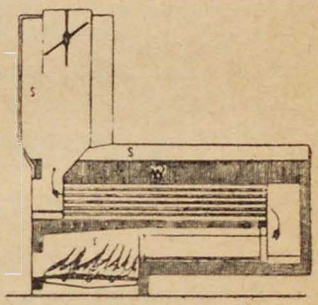
в 1804 г. Поэтому в 1806 г. Фультон вернулся в Америку и занялся, при денежной поддержке Ливингстона, сооружением парохода. Для этой цели Фультон заказал в Англии паровую машину на заводе Болтона и Уатта. В 1807 г. пароход «Клермонт» («Clermont» или «Claremont») был закончен и Фультон произвел опытную поездку на нем по р. Гудсон из Нью-Йорка в Альбани в августе 1807 г. При этом расстояние в 150 миль было пройдено в 32 часа. В 1808 г. были открыты регулярные рейсы между Нью-Йорком и Альбани, причем приток пассажиров сделался скоро так велик, что одного парохода оказалось недостаточно и в Соединенных Штатах, а затем в Англии и в других странах, началась усиленная постройка пароходов.

Машина «Клермонт» изображена на фиг. 39.[1]

Этим заканчивается период создания парохода и начинаются годы быстрого развития пароходства. Из сделанного краткого очерка работ по созданию парохода видно, что это создание еще в меньшей степени, чем создание самой паровой машины, носит индивидуальный характер: над решением поставленного вопроса одновременно работает большая группа изобретателей, находящая решения, не особенно резко отличающиеся друг от друга. Поэтому в этом вопросе споры о приоритете еще менее целесообразны, чем в других крупных изобретениях.

Распространение пароходных машин и их первые усовершенствования

Фультон умер в 1815 г., но к этому времени пароходостроение получило уже большое развитие. В Соединенных Штатах особенных успехов в постройке пароходов достиг Роберт Стевенс (сын Джона Стевенса). Он изменил тип машины, предложенной Фультоном (с качающимся рычагом) и принял в своих пароходах (1830 г. пароход «Северная Америка») чисто балансирный тип машины Уатта (фиг. 40).



Фиг. 41

Парораспределение он производил при помощи двухседельных клапанов. Тип этот на долгое время сделался нормальным в американских пароходах. Одновременно с этим он изменил и тип парового котла, введя котел с обратным движением газов по жаровым трубам — тип, долгое время являвшийся самым распространенным в судовых установках (фиг. 41).

Самим Фультоном (в 1814 г. во время войны Соединенных Штатов с Англией) начата была постройка военного судна (неоконченная вследствие скорого заключения мира). Р. Стевенс много занимался позже проектами бронированных судов (которые, впрочем, практически были осуществлены впервые в 1854 г. французами при взятии Кинбурна и во время междуусобной войны в Соединенных Штатах в 1863 г.).

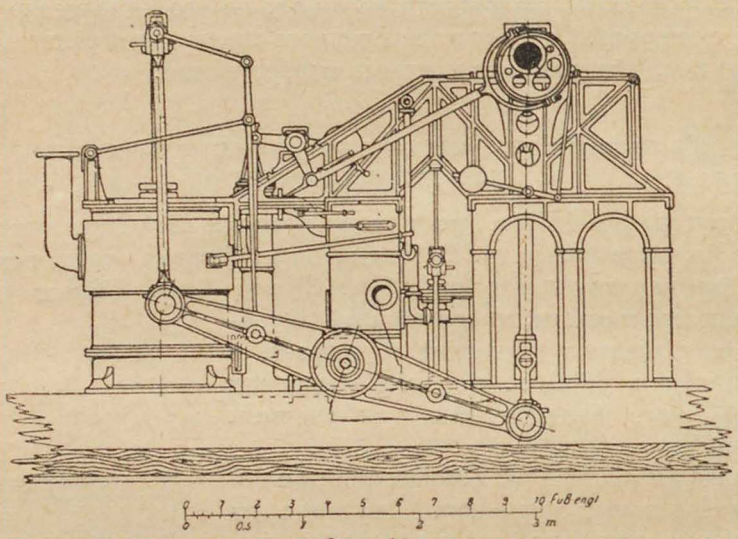
После истечения срока патента Фультона (в 1821 г.) кроме Стевенса постройкой пароходов в Америке занялись другие конструктора, внесшие ряд усовершенствований, на которых мы не можем останавливаться.

Уже в 1812 г. в Соединенных Штатах насчитывалось до 50 пароходов. Эти пароходы обслуживали сначала реки, большие озера и побережье Соединенных Штатов, но в 1818—1819 гг. пароход «Саванна» совершил переход из Нью-Йорка до Ливерпуля и затем до Петербурга.[2] Впрочем, регулярные сообщения между Америкой и Англией начались значительно позже — только в 1838 г.

[1] Детали этой машины имеются у Рюльмана. Цит. соч., т. IV, стр. 226.

[2] Детали машины на «Саванне» см. у Рюльмана. Цит. соч. т. IV, стр. 225.

К этому времени в Англии уже развилось собственное крупное пароходостроение. По данным, приведенным у Рюльмана, до конца 1815 г. в Англии было уже построено до 20 пароходов, а по данным Беута,[1] до 1823 г. было их построено уже до 160. В этом пароходостроении большую роль играл Белль, о судне которого «Комета» мы уже упоминали. Военное паровое судостроение началось в Англии в 1833 г.



Фиг. 42

Во Франции заметные размеры пароходостроение начинает приобретать около 1820 г., а в 1823 г. начинается даже применение пара к военным судам.

Не входя в подробности относительно других стран (в которых тоже постепенно развивалось пароходостроение), приведем только некоторые данные о первых пароходах в России. [2] Постройка пароходов в России началась чрезвычайно рано: первый пароход был построен в 1815 г. англичанином Чарльзом Бердом. Затем он построил свой завод, о котором уже говорилось выше и уже в 1820 г. построил 4 парохода для сообщения между Петербургом и Кронштадтом. В 1817 г. Берд получил 10-летнюю привилегию на постройку паровых судов. Дальнейшие сведения о развитии пароходства в России будут приведены дальше.

В европейских конструкциях балансирных машин балансир помещался не сверху, а снизу с 2 сторон цилиндра. Пример такой машины приведен на фиг. 42.

---

[1] Beuth. Verhandlungen des Ver. zur Beförd. des Gewerbefleisses, стр. 178—182, 1824.

[2] А. А. Брандт. Столетний юбилей пароходного дела в России. Теплоход, 1917.

Глава II

РАЗВИТИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ПАРОВОЙ МАШИНЫ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX СТОЛЕТИЯ

Конструктивные усовершенствования машины Уатта

Срок патента Уатта истек в 1800 г. и около этого же времени Уатт и Болтон удаляются от ведения дел на заводе в Сохо. Таким образом и на самом заводе Сохо и на других заводах, занимавшихся постройкой паровых машин, открывается свободная область для усовершенствований и изменений конструкции. Балансирная машина оставалась долгое время преобладающим типом. Из изменений, внесенных в нее в первые же годы после окончания срока патента Уатта, следует упомянуть прежде всего о замене деревянных частей — железными и об устройстве общей рамы, на которой закреплялись все части машины (включая и подшипники для балансира и цапфу для основной тяги параллелограма Уатта).

Конечно, только это освобождение от соединения со зданием могло обеспечить точную установку и правильную работу машины.

Далее — планетная передача очень быстро заменилась простой кривошипной передачей. Наконец, широкое применение нашли золотники, вытеснившие в значительной степени применявшиеся в машинах Уатта клапаны.

Изобретение золотника сделано было в 1799 г. сотрудником Уатта инженером Мурдоком.

Этот золотник изображен на фиг. 43.

Впуск пара — внутренний (через отверстие 3), выпуск из верхней части делается через трубку, составляющую часть золотника.

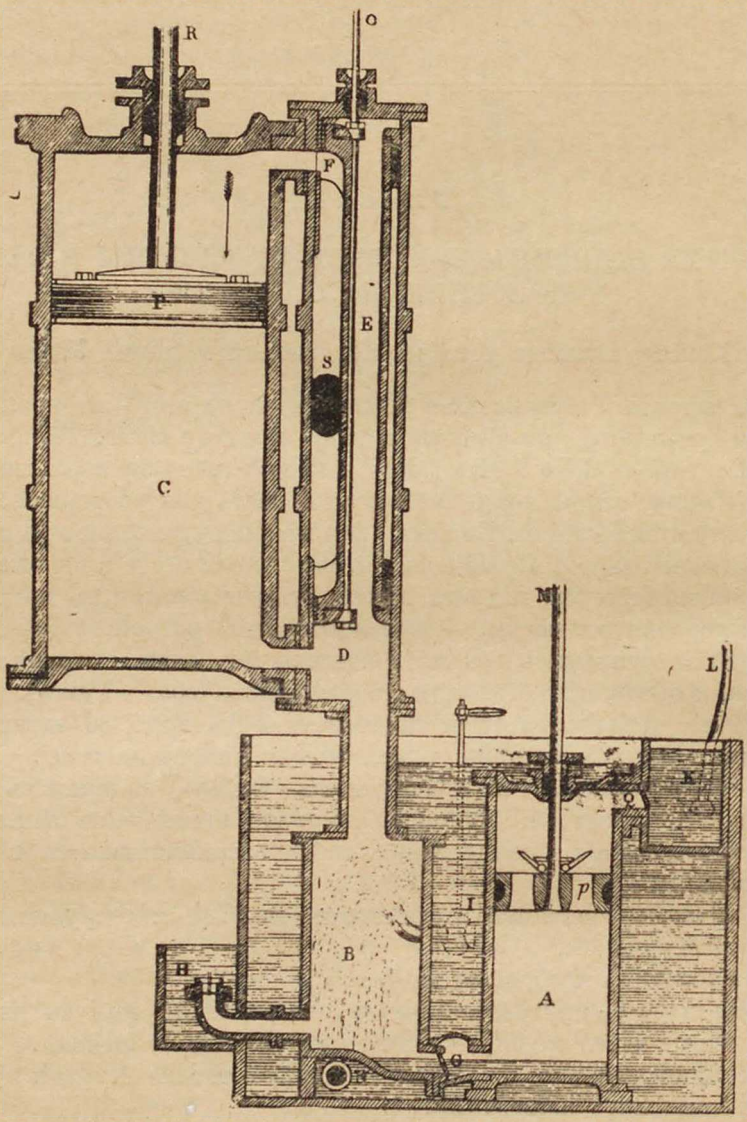
Для приведения в движение золотника тот же Мурдок предложил в 1799 г. применять эксцентрик.

Эти новые органы, введенные Мурдоком, играли большую роль во всей дальнейшей истории паровой машины.

Машина Уатта с этими изменениями (постройки около 1830 г.) изображена на фиг. 44.

Мощность этой машины — 20 л. с. Рабочее давление в котле у нее только 0,11—0,22 кг/см^2 по манометру. Размеры: диаметры цилиндра — 633 мм; ход поршня — 1530 мм.

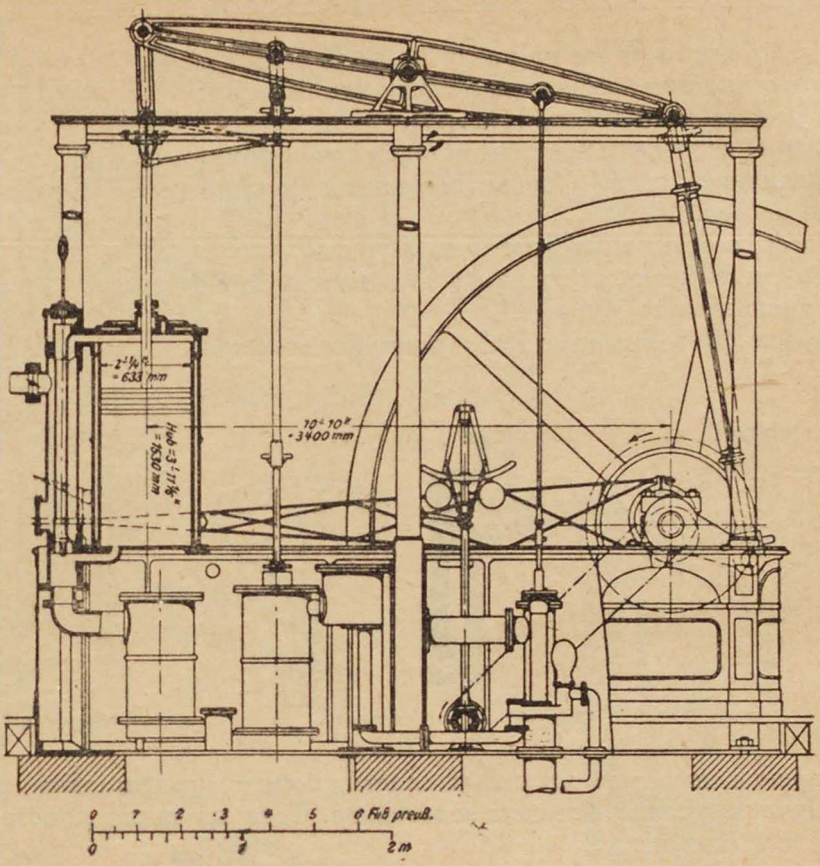
Наряду с золотниками, в балансирных машинах продолжали совершенствоваться и клапаны. Некоторые конструкции клапанов того времени изображены на фиг. 45 (клапан Вульфа) и фиг. 46.



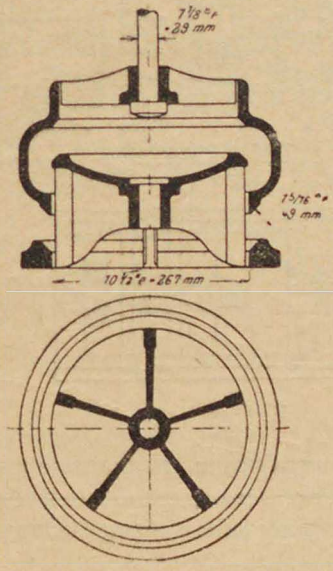
Фиг. 43

Вторая конструкция особенно интересна, как предшественница двухседельных клапанов, применяемых в позднейших пораспределителях.

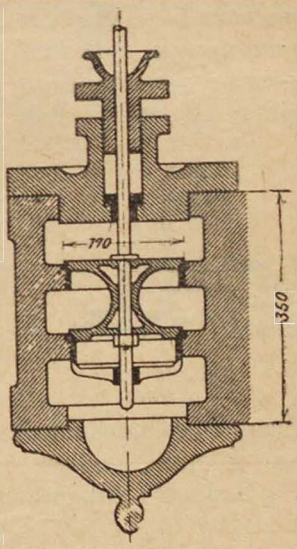
Золотниковые пораспределения тоже строились в разных формах: кроме золотника Мурдока предложен был золотник Мурреем (в 1802 г.).



Фиг. 44



Фиг 45



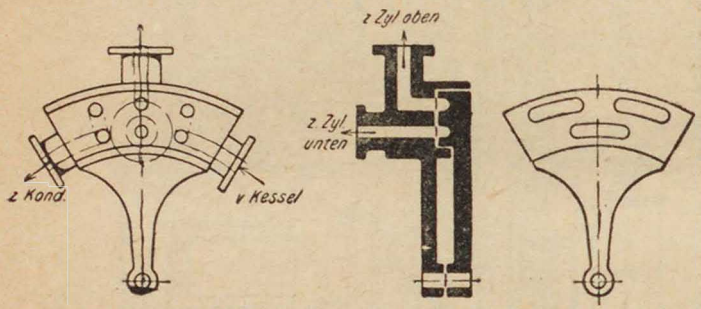
Фиг. 46

Этот золотник состоял из качающейся пластинки, открывающей и закрывающей каналы для впуска и выпуска пара из цилиндра (фиг. 47).

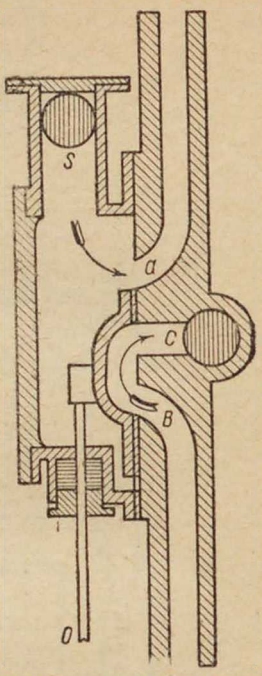
Скоро золотники приняли нормальную форму, сохранившуюся и до настоящего времени, как показано на фиг. 48.

Здесь, в отличие от золотника Мурдока, впуск внешний и выпуск внутренний; эта конструкция тоже принадлежит Муррею.[1]

Позже было обращено также внимание на боль-



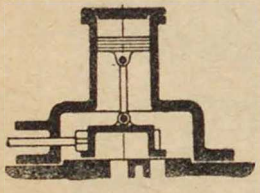
Фиг. 47



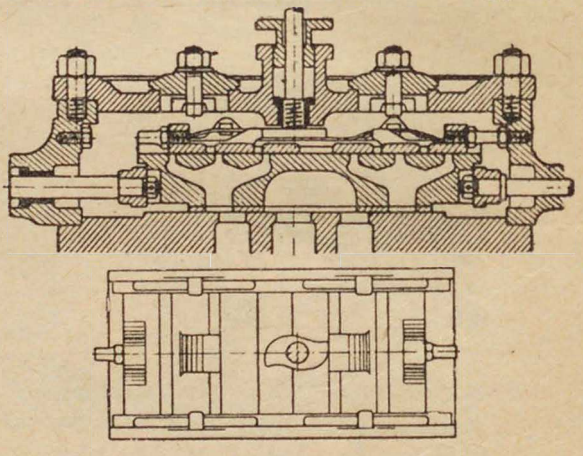
Фиг. 48

шое трение, даваемое простыми золотниками и предлагались разные конструкции уравновешенных золотников. Одна из таких конструкций изображена на фиг. 49.

Другой недостаток простого золотника — невозможность получения при них малых наполнений — тоже рано обратил на себя внимание, и для



Фиг. 49

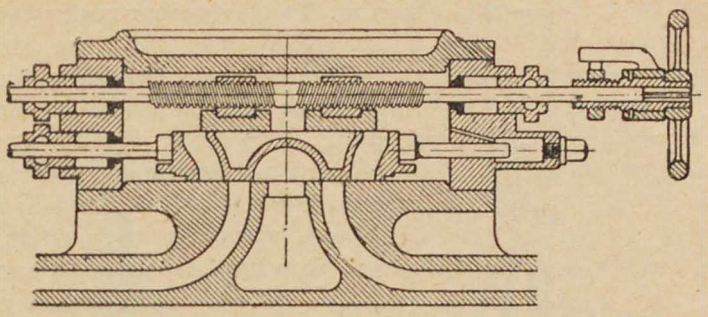


Фиг. 50

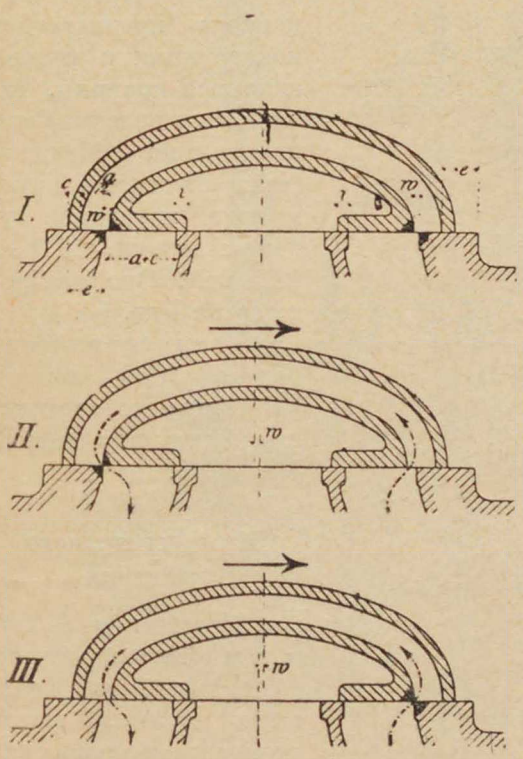
устранения его предлагались сначала конструкции золотников с каналами и пластинками наверху, задерживаемыми особенными упорками. Первая такая конструкция предложена была Эдвардсом

[1] Тредгольд, франц. перевод, § 446, табл. VII, фиг. 5.

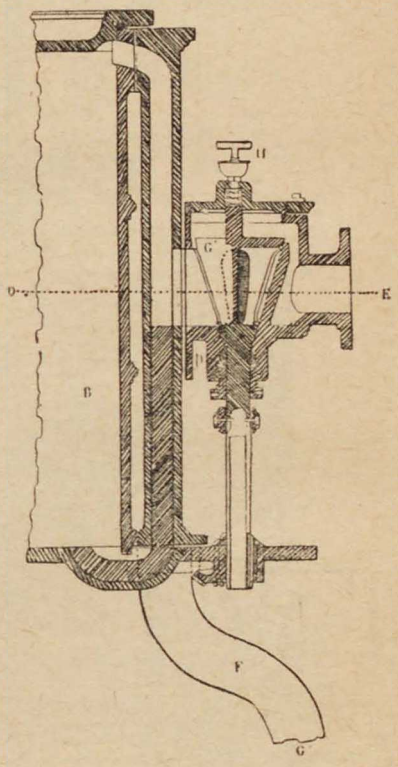
(Edwards) в 20-х годах, но особенной известностью пользуется конструкция Фарко, [1] предложенная в 1836 г. (фиг. 50).



Фиг. 51



Фиг. 52

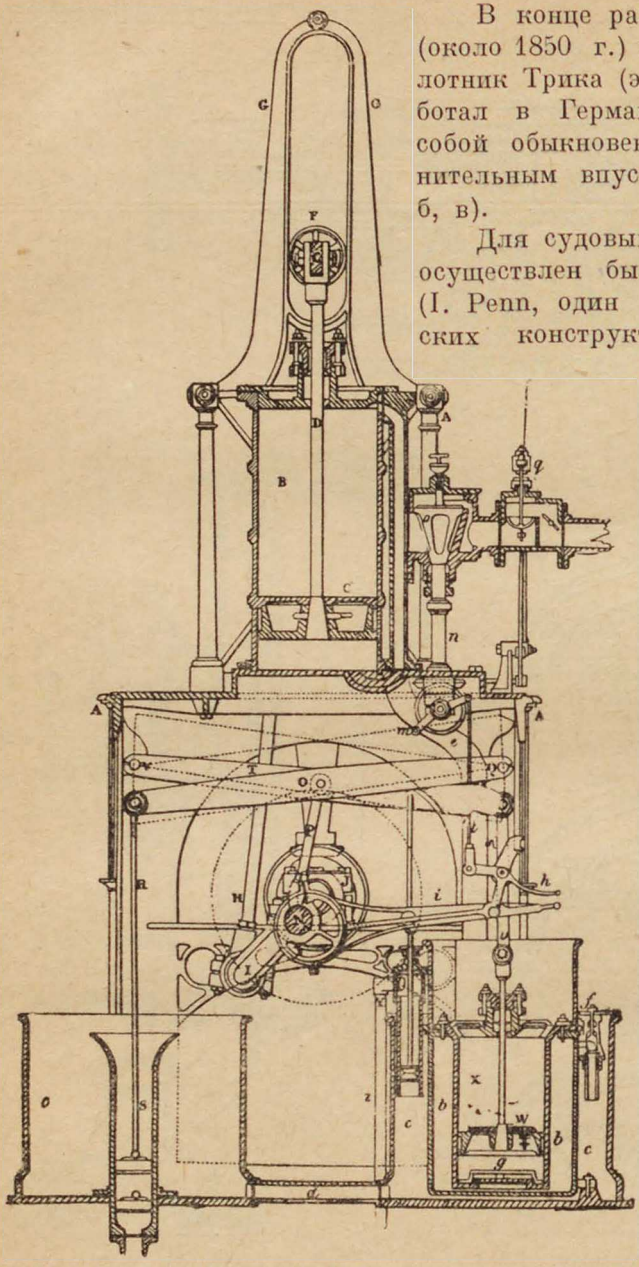


Фиг. 53

Несколько позже (французский патент 23 апреля 1842 г.) предложена была конструкция двойного золотника (см. фиг. 51) французским конструктором Мейером (I. G. Meyer).

В конструкции этой возможно изменение степени наполнения от руки.

[1] Владелец завода в Париже.



Фиг. 54

В конце рассматриваемого периода (около 1850 г.) появляется, наконец, золотник Трика (эльзасский уроженец, работал в Германии), представляющий собой обыкновенный золотник с дополнительным впуском пара (фиг. 52 а, б, в).

Для судовых машин тот же принцип осуществлен был в золотниках Пенна (I. Penn, один из крупнейших английских конструкторов судовых машин, 1805—1878 гг.).

Наконец, в начале же рассматриваемого периода предлагались конструкции с вращающимися кранами. Такое распределение было предложено Маудсли (тоже одним из крупных конструкторов судовых машин, 1771—1831 гг.). Оно изображено на фиг. 53.

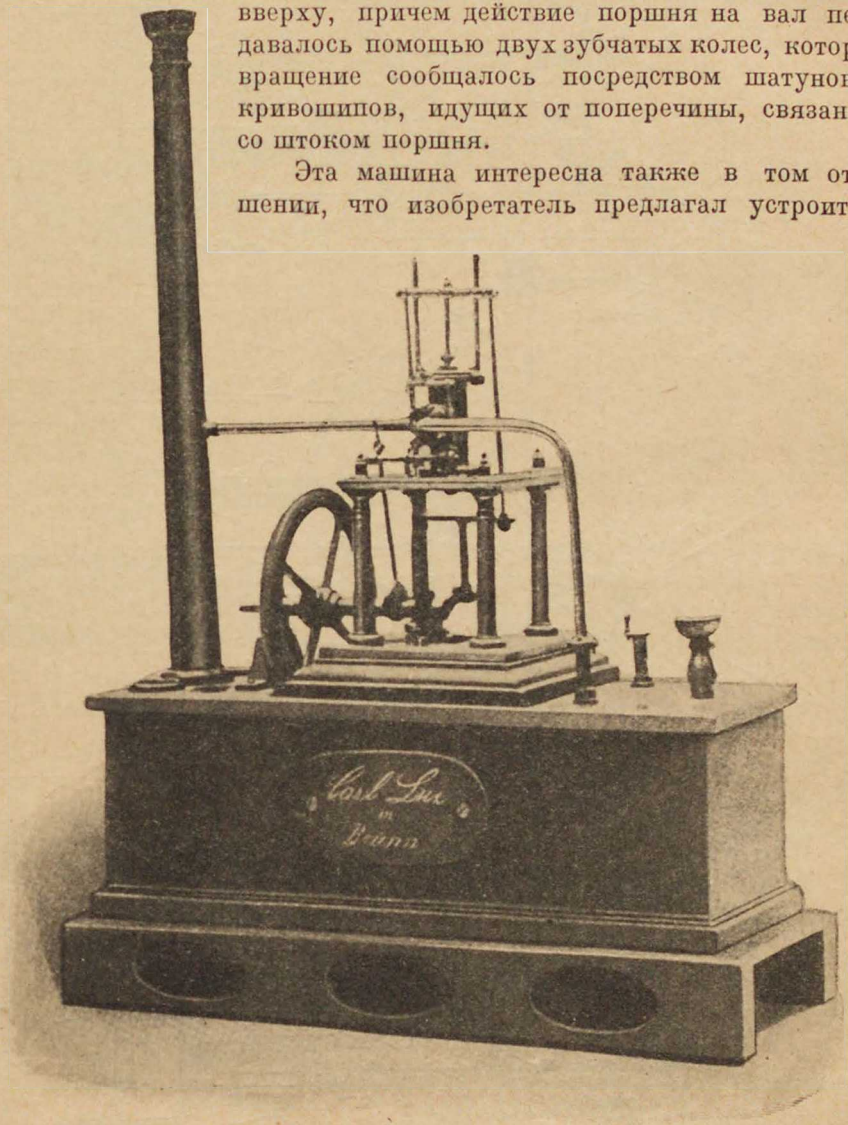
Распространения оно не получило, но явилось прототипом для кранных распределений Корлисса.

Машины прямого действия

Машины с балансиром не допускают сколько-нибудь большого числа оборотов вследствие больших сил инерции, развиваемых тяжелой массой балансира. Помещение ее наверху еще более увеличивает неустойчивость машины. Кроме того, эти машины требовали очень большого места. Поэтому уже очень рано стали делаться попытки коренного изменения паровой машины даже при сохранении ее вертикальной конструкции с цилиндром внизу или наверху. Разных конструкций

этого рода предлагалось много: уже в 1802 г. Мурдок построил машину с качающимся угловым рычагом вместо балансира; в 1797 г. предлагалась Картрайтом машина с валом, лежащим вверху, причем действие поршня на вал передавалось помощью двух зубчатых колес, которым вращение сообщалось посредством шатунов и кривошипов, идущих от поперечины, связанной со штоком поршня.

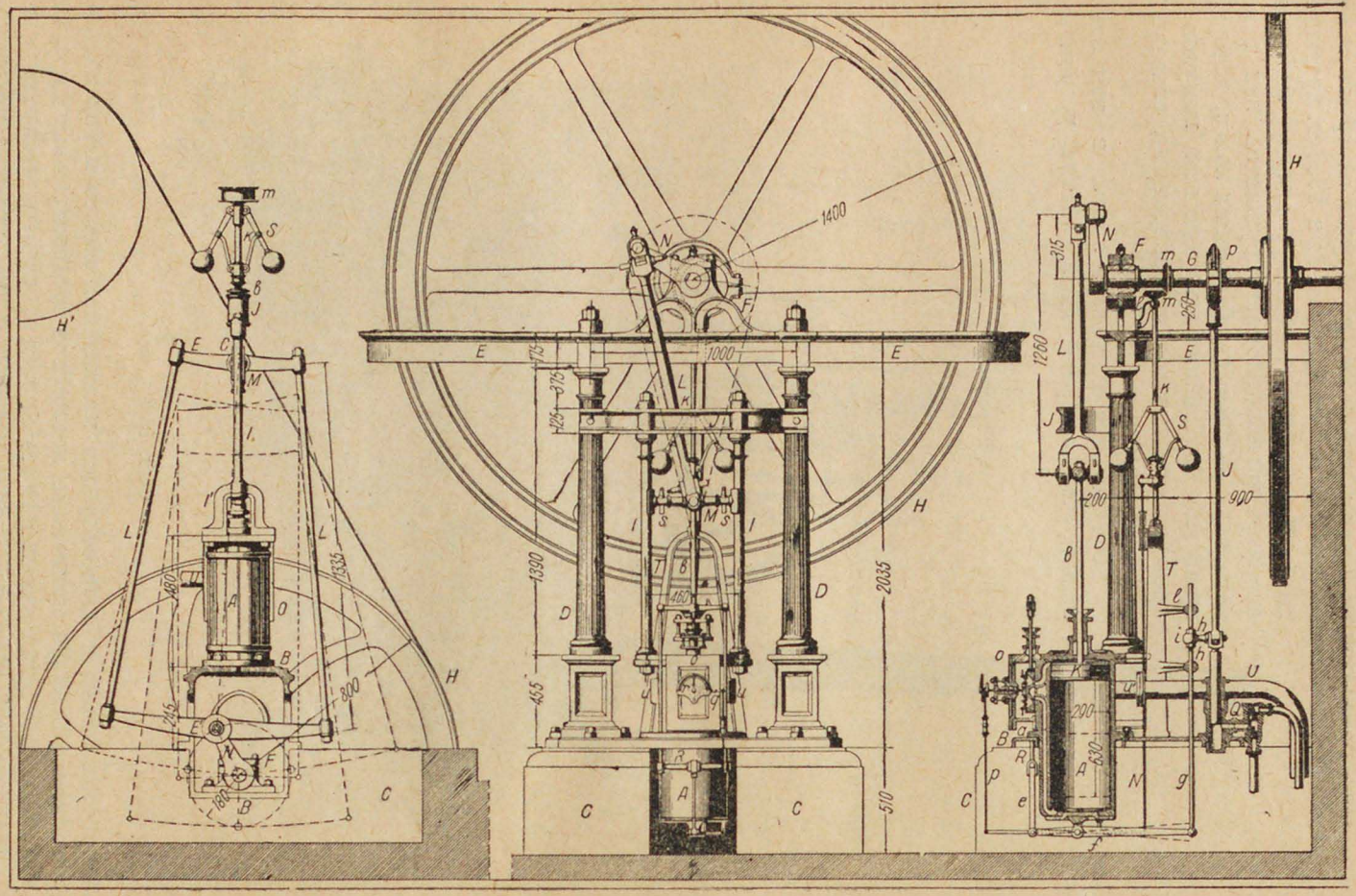
Эта машина интересна также в том отношении, что изобретатель предлагал устроить в



Фиг. 55

ней поверхностный конденсатор для применения вместо паров воды — паров спирта или эфира, применение которых он предполагал выгоднее, чем паров воды. Этот вопрос много раз разбирался впоследствии теоретически.

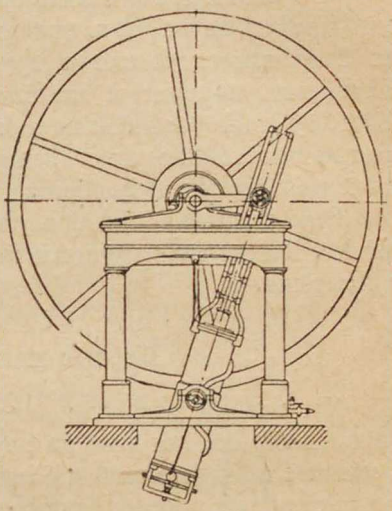
Предлагались и разные другие устройства, например, с прямилом, основанном на свойствах гипоциклоиды превращаться в прямую, если


H'
m
S
r
b
U
E
G
M
I
L
A
O
B
C
H
1335
800
245
180
1400
N
F
1000
175
125
K
J
1300
455
2035
510
D
180
315
1260
m
G
p
280
200
900
T
ℓ
i
h
o
U
Q
200
630
R
N
g
e
d

Фиг. 56.

диаметр круга, производящего гипоциклоиду, равен радиусу неподвижного круга, но все они, как и ранее описанные, успеха не имели. Более удобной оказалась машина, предложенная Маудсли, изображенная на фиг. 54.

В ней шток поршня имеет наверху направляющие, по которым движется ползун (снабженный колесами); от этого ползуна сделана передача вниз помощью шатуна и кривошипа.[1]

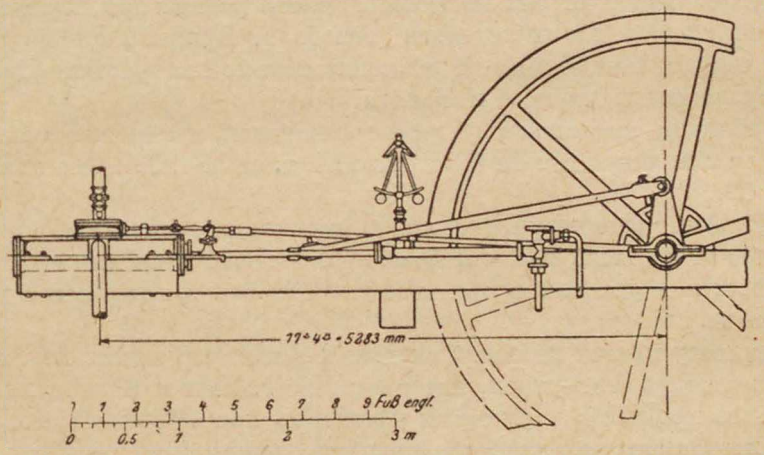


Фиг. 57

Такого рода машины (несколько измененные) нашли применение в Германии (машины Эггельса в Берлине 1840—1850 гг.) и в Австрии машины Луца (C. Luz).

Модель такой машины, исполненной на Брюннском машиностроительном заводе, показана на фиг. 55, взятой из специального издания, посвященного столетию завода. [2] Для малых мощностей получил большое распространение тип машины с помещением вала наверху, с крейцкопфом и шатунно-кривошипной передачей от него к валу. Одна из таких машин (мощностью в 10 л. с.) показана на фиг. 56.

Близко подходят к вертикальным машинам машины с качающимся цилиндром, впервые предложенным Мурдоком (1785 г.), но осуществлен-



Фиг. 58

ные и введенные в практику Каве во Франции (1820 г.) и Монби в Англии. Благодаря своей компактной конструкции эти машины находили тоже известное распространение для малых мощностей и в качестве судовых

[1] На фиг. 54 видно и кранное распределение Маудсли.

[2] Erste Brünner Maschinen-Fabrik-Gesellschaft, 1821—1921. Lpz. 1921.

машин, но позже (к 60-м годам прошлого столетия) вышли из употребления. Одна из таких машин (Каве) изображена на фиг. 57.

Что касается горизонтальных машин, то их тоже строили в этом периоде (Перье уже в 1792 г. проектировал такую машину), но в осуществлении их встретилась большая трудность в предупреждении одностороннего истирания поршня и цилиндра и получающегося пропускания пара. Поэтому такие машины нашли в этом периоде применение только для малых мощностей и то не особенно широкое. Одна из таких машин (американской конструкции) изображена на фиг. 58.

Она устроена с деревянной рамой и направляющими в виде двух штанг. Такая конструкция отличалась дешевизной и нашла применение в Америке.

Первые машины высокого давления

Мы видели уже, что начиная с самых первых попыток применения пара, изобретатели шли по двум путям — применения низкого давления, в связи с конденсацией и более высокого давления, обыкновенно предлагавшегося для работы без конденсации. Уатт в своем патенте 1769 г. предусмотрел как работу машин с конденсатором, так и работу без конденсатора, которая должна была производиться при более высоком давлении пара; фактически же машины Уатта работали при очень низком давлении порядка 1,2—1,5 ата.

Уатт и Болтон очень тщательно защищали права, охраняемые их патентом. Они вели ряд процессов против разных лиц, которых обвиняли в нарушении своих патентов (Генсборо, Булль, Горнблоуэр). Для истории первой машины имеет значение только изобретение Джонатана Горнблоуэра и его процесс с Уаттом.

Горнблоуэр предложил устройство машины двойного расширения,[1] на которое и получил патент (13 июля 1781 г. за № 1298). Она изображена на фиг. 59.

Применение балансира, как видно из этого рисунка, особенно удобно для машин этого типа, так как цилиндр высокого давления просто помещается ближе к оси балансира и тем самым в нем получается меньший ход поршня.

Постройку машин по своей системе Горнблоуэр начал в начале 90-х годов, но развить ее не успел, так как в 1793 г. Уатт и Болтон возбудили против него процесс о нарушении патентных прав. Процесс этот прошел разные инстанции сложного английского судопроизводства и, наконец, окончательно решен был в пользу Уатта в 1799 г.

Стесненный условиями патента Уатта, Горнблоуэр не мог применять отдельного конденсатора и он также не применял в своей машине достаточно высокого давления. Поэтому выгода большего расширения

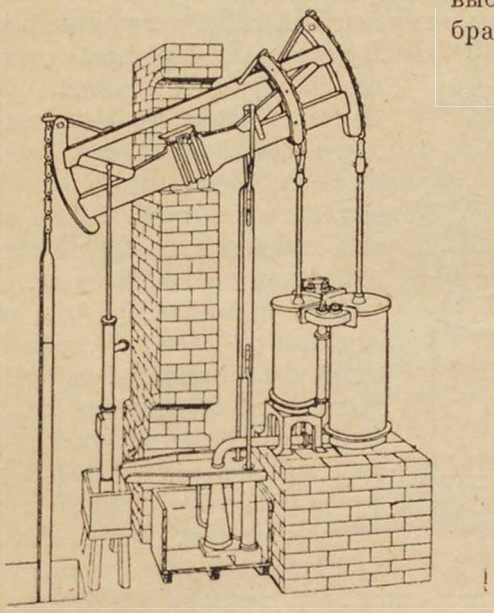
[1] При этом он преследовал не достижение экономии в расходе пара, а более равномерное распределение движущей силы.

в двух цилиндрах и не могла особенно сказаться, и машины Горнблоуэра давали в среднем расход того же порядка, что и в машинах Уатта.

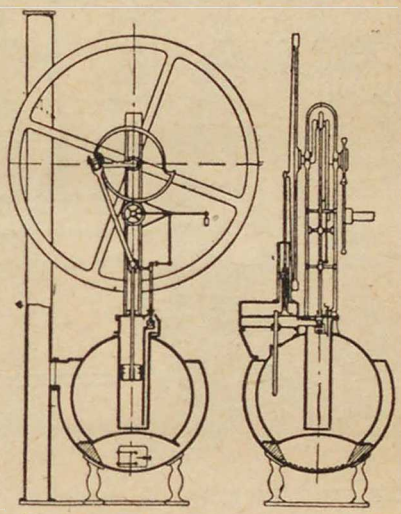
Настоящее движение в пользу применения пара высокого давления начинается около 1800 г., после истечения срока патента Уатта. В Англии это движение представлено Тревитиком и Вульфом, в Америке— Эвансом.

Тревитик, как было уже сказано, являлся тоже одним из крупных изобретателей той эпохи; главные заслуги его лежат в области парового транспорта; о них будет говориться дальше. После нескольких опытов с моделями, Тревитик берет в 1800 г. патент (№ 2599) на машину высокого давления. Машина эта изображена на фиг. 60.

Как видно из рисунка, цилиндр



Фиг. 59



Фиг. 60

машины входит в проекте Тревитика внутрь котла. Направляющие для крейцкопфа помещены над цилиндром, от крейцкопфа сделана шатунно-кривошипная передача к валу, лежащему наверху. В других своих машинах Тревитик ставил вал внизу и делал передачу к нему сверху, как показано на фиг. 61.

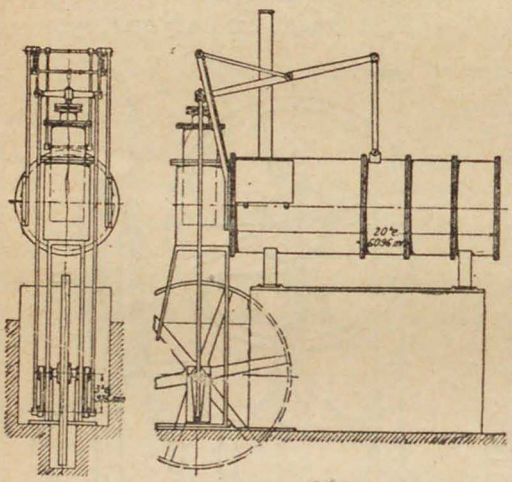
Этот рисунок изображает прокатную машину Тревитика. Для получения приблизительного прямолинейного движения в ней применено прямило Эванса; отходящий пар применяется для нагревания питательной воды. Давление в машине Тревитика достигало от 3,5 до 7 атм. Аналогичную систему Тревитик применял также в своем локомотиве (о котором будет говориться дальше).

Вульф предложил свою машину в 1804 г., когда истекли сроки патентов, как Уатта, так и Горнблоуэра. Патент на свою машину Вульф получил 17 июня 1804 г. (№ 2772). Система Вульфа представляет

соединение машины Горнблоуэра с отдельным конденсатором, как у Уатта. [1]

Применение своей системы Вульф обосновывал особым законом расширения пара, на точности которого он очень настаивал, но который оказался совершенно неверным и который повел бы к совершенно неосуществимым отношениям объемов цилиндра; однако Вульф отличался большим конструктивным талантом и на практике выбирал правильные отношения размеров. Первая машина Вульфа была поставлена на одной пивоварне в Лондоне. В 1812 г. он переселился в Корнваллис, где поставил ряд машин своей системы для откачивания воды.

Вульф применял в своих машинах давление до 3—4 атм. и полное расширение в 6—9 раз. Цилиндры в первоначальной конструкции машин Вульфа располагались с одной стороны (как и в машине Горнблоуэра), так что направление движения поршней было в одну сторону; оба цилиндра были двойного действия. Таким образом, перетекание пара происходило, как показано на фиг. 62.



Фиг. 61

Результататы работы водоподъемных машин Вульфа были очень благоприятны: на один бушель сожженного угля (84 англ. фунта=38,1 кг) получалась работа, равная 40 000 000 фунтофутов в поднятой воде,[2] т. е. на 1 кг сожженного угля—1 445 850 кгм, что дает уже около 4% утилизации теплотворной способности топлива. Несмотря на эти благоприятные результаты, машины с расширением в двух цилиндрах медленно входили в практику: их заметное распространение относится уже к 50-м, 60-м годам XIX столетия. Долгое время всякие машины с двумя цилиндрами сохраняли в своем названии имя Вульфа,[3] хотя почти одновременно с Вульфовой появилась масса систем машин двойного расширения, отличавшихся не только конструктивными деталями, но и расположением

[1] Tredgold. Цит. соч., ч. 1, стр. 149.

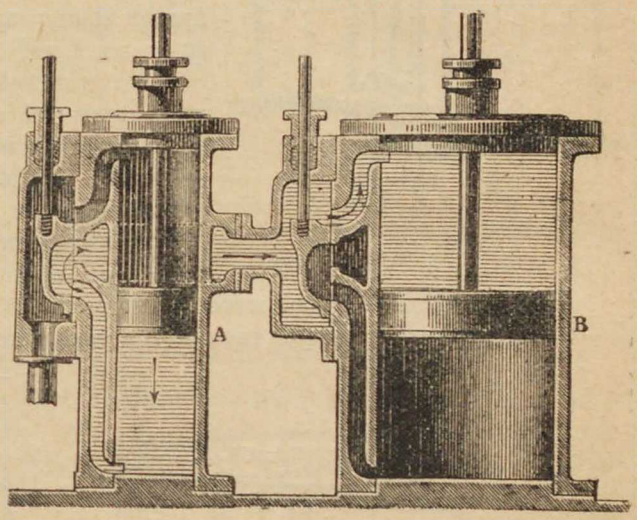
[2] В новейшее время деятельности Вульфа посвящено обстоятельное исследование Rhis Jenkins'a, опубликованное в трудах Ньюкоменовского общества (Rhis Genkins. A cornisch Engineer Arthur Woolf (1766—1877). Transactions of the Newcomen Society, vol. XIII, 1932—1933.

[3] Так, например, Бульвен (Boulvin) называет машинами Вульфа (Boulvin. Cours de mécanquie appliquée aux machines, 5-me Fascicule, 2-me edition, Paris, 1909, стр. 88 и сл.) машины с 2 цилиндрами с совпадающим или прямо противоположным движением поршней. При цилиндрах, действующих каждый на свою шатунно-кривошипную передачу, это определение приводит к условию, что угол между кривошипами равен 0°

цилиндров и порядком перехода пара из одного цилиндра в другой (Saddler, Robertson, Aitken and Steel и др.). [1] Во Франции машины Вульфа были введены его первоначальным компаньоном Эдвардсом, основавшим там в 1819 г. свой завод по постройке паровых машин.

Машины Вульфа строились, главным образом, балансирные с помещением обоих цилиндров с одной стороны балансира рядом друг с другом (что создавало удобные короткие трубопроводы), как показано на фиг. 63.

Мак Ноут (Mac Nought) предложил в 1845 г. ставить цилиндры по двум сторонам балансира (английский патент № 11001); это расположение оказалось удобным для переделки одноцилиндровых машин в машины двойного расширения: существующий цилиндр одноцилиндровой машины оставался как цилиндр высокого давления, а с другой стороны балансира (но не на самом конце его) ставился цилиндр низкого давления; шатунно кривошипная передача оставалась на своем месте, как показано на фиг. 64.



Фиг. 62

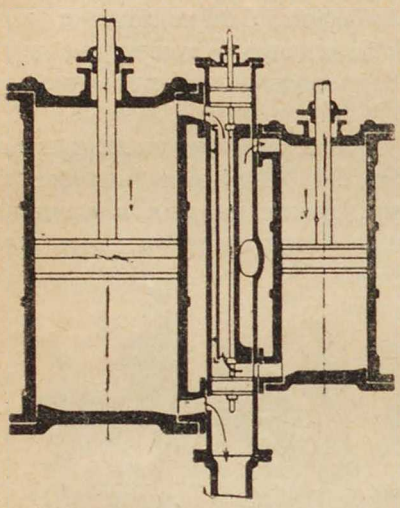
В 20-х годах прошлого столетия появились также предложения машин тройного расширения. Но эти предложения носили в это время чисто теоретический характер, попыток осуществления их не делалось до самого конца 40-х годов прошлого столетия; настоящее же введение машин многократного расширения в практику относится к позднейшему периоду нашего очерка.

Последний из названных нами инициаторов применения пара высокого давления — Оливер Эванс (Oliver Evans) является одним из крупнейших американских инженеров (родился в 1755 г., умер в 1819 г.). Эванс ознакомился со всем материалом имевшихся исследований физических свойств водяного пара и пришел к заключению о выгодности применения пара высокого давления в связи с значительным расширением.

или 180°. В отличие от этого, позже предложены были машины двойного расширения с кривошипами под прямым углом друг к другу (о них мы будем говорить позже). Им присвоили название «машин компаунд» (хотя этот термин применялся Уаттом в патенте 1782 г. в применении просто к машинам с 2 цилиндрами).

[1] C. Matschoss. Цит. соч., стр. 439 и след.; там же приведен и ряд позднейших комбинаций цилиндров, предлагавшихся в 40 годах.

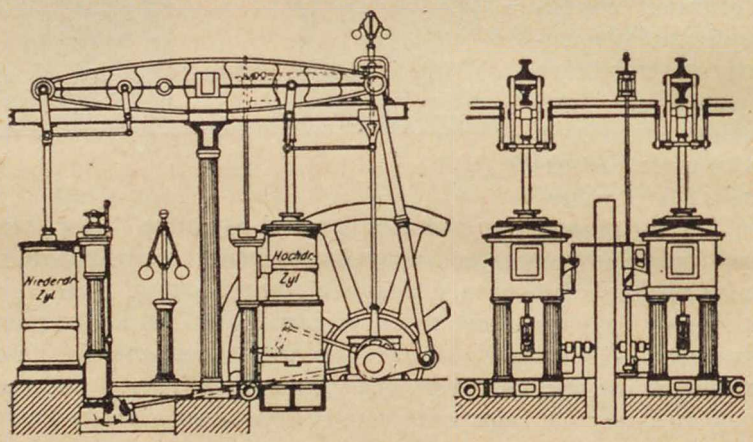
Он писал, что пар с давлением в 120 англ. фунт. на дм² (8,44 кг/см²) при наполнении в одну треть и расширении до 15 англ. фунт. на дм² (1,05 кг/см²) дает в 6 раз большую работу, чем пар с давлением в 15 англ. фунт. на 1 дм² при полном наполнении, тогда как затрата тепла будет почти одна и та же. Машины Эванса выходили гораздо меньшими, чем машины низкого давления и стоили гораздо дешевле. Число оборотов в них равнялось 36 в минуту, ход поршня — около 1 м, что дает среднюю скорость поршня, равную 1,2 м/сек; среднее индикаторное давление в своих машинах Эванс принимает равным 50 англ. фунт. на 1 дм² (3,52 кг/см²).



Фиг. 63

Из деталей машин Эванса следует упомянуть об особом соединении штока поршня с балансиром помощью оригинального механизма, называемого параллелограмом Эванса. В качестве парораспределительного органа Эванс применял вращающийся кран.

Деятельность Эванса, хотя и не очень долгая, совпала с периодом быстрого развития американской промышленности, наступившем после



Фиг. 64

окончания войны за освобождение от английского владычества. Особенно развивалось мельничное дело, в области которого Эванс много работал. Он составлял также проекты паровых экипажей и пароходов. Но главное значение Эванса для американской техники представляют все же его машины высокого давления, положившие вообще начало самостоятельному развитию и постройке паровых машин в Америке.

Предложения машин прямого действия и машин повышенного давления, хотя и не повлекли за собою вначале крупного переворота в паровой технике (балансирная машина оставалась до конца этого периода в общем преобладающим типом паровой машины), но создали возможность применения паровой машины в таких областях, где применение балансира или конденсации невозможно (или очень неудобно). Кроме того, эти попытки повлекли за собою общее повышение давления в паровых машинах, хотя и очень медленное. Терстон приводит следующую таблицу, показывающую постепенное повышение давления впуска пара в паровых машинах по десятилетиям.

1800	от 0	до	1,35 атм.	1860	от 1,40	до	2,11 атм.
1810	» 0,35	»	0,49 »	1870	» 2,11	»	4,22 »
1820	» 0,35	»	0,70 »	1880	» 4,22	»	6,23 »
1830	» 0,70	»	1,40 »	1885	» 5,23	»	8,50 »
1840	» 1,05	»	1,46 »	1890	» 8,00	»	14,00 »
1850	» 1,05	»	1,71 »				

Конечно, эти цифры являются только некоторыми средними величинами, от которых в каждую эпоху были отклонения в ту и другую сторону.

Попытки применения особенно высокого давления

Успехи, достигнутые машинами Эванса и Тревитика, вызвали сильное движение в области создания машин особенно высокого давления. Большинство этих изобретений оставались вовсе неосуществленными, другие вызывали к себе большое внимание и встречались с преувеличенными похвалами и надеждами. Но надлежащей технической подготовки к прочному внедрению этих изобретений в промышленность не было и изобретения эти, невполне доведенные до конца (по крайней мере до практического осуществления и надежной работы), в скором времени оставлялись и забывались. К числу таких изобретений принадлежат предложения Перкинса в Англии и Альбана в Германии.

Перкинс родился в 1766 г., умер в 1849 г. В 1822 г. он переселился в Англию и взял там патент на получение пара высокого давления. Аппарат Перкинса состоял из закрытого котла, в котором вода нагревалась до высокого давления (без испарения). Затем часть воды выпускалась и немедленно испарялась, давая пар высокого давления, отправляемый или прямо в машину, или в особый паросборник. Вода выпускалась из котла сверху, а впускалась для пополнения снизу. Давление пара учитывается различно. [1]

В первых своих машинах Перкинс ставил предохранительные клапаны на давление между 30—38 кг/см², в 1827 г. он хотел

[1] Неизвестно, насколько точно измерялось это высокое давление, так как манометр Бурдона был изобретен позже — в 1851 г.

применить давление свыше 56 кг/см^2.[1] При этом высоком давлении возникали чрезвычайно большие затруднения со смазкой цилиндра. Перкинс применял также большое (по сравнению с тогда применявшимся) число оборотов, доходившее до 125 в минуту. Чтобы избежать при этом изменении направления давления на поршень удара, он строил свои машины с цилиндрами простого действия.

Но несмотря на все усилия Перкинса, огромные затраченные средства и изменения, вносимые им в конструкцию своих машин (патенты 1823 и 1827 гг.), они не могли долго работать и вскоре все его предприятие вынуждено было закрыться. Неудача опытов Перкинса в связи с чрезвычайно большими, но несбывшимися ожиданиями от его изобретения надолго скомпрометировала в Англии идею применения высокого давления и повела там к утверждению убеждения в преимуществах Уаттовских машин низкого давления. Этой практике содействовали также опасения за паровые котлы при применении пара высокого давления: применение ненадлежащих материалов (чугуна и железа низкого качества), недостаточная выработанность конструкций давали основательный повод для этих опасений, и во многих государствах введены были ограничения в отношении применяемых давлений. [2]

Другим известным представителем идеи паровых машин высокого давления явился немецкий инженер Альбан (1791—1856). Альбан работал сначала в Англии, как раз в период увлечения там идеей Перкинса о применении пара особенно высокого давления.

Он сам разработал конструкцию машины для применения давления порядка 40 атм. Технически проект Альбина разработан недурно, как показывает фиг. 65.

Машина его (тоже простого действия) имеет цилиндр малого диаметра и поршень плунджерного типа. Она отличается большой простотой, к которой Альбан стремился, желая облегчить изготовление своей машины.

Размеры машины в 10 л. с. получались такие: диаметр —76,2 мм, ход поршня — 457 мм; число оборотов в минуту—60, применяемое давление — 45,7 ата, расширение делалось трехкратное. Однако, при всем конструктивном таланте Альбана, ему не удалось довести изобретения до конца: машины его требовали новых усовершенствований и затрат и в скором времени опыты Альбана по созданию машин высокого давления тоже пришлось прекратить. Поэтому он вернулся в Германию и там занялся машиностроением в разных областях и постройкой машин более умеренного давления в 8—10 атм.

Машины эти он строил вертикальные с цилиндром вверху, тоже очень своеобразной конструкции.

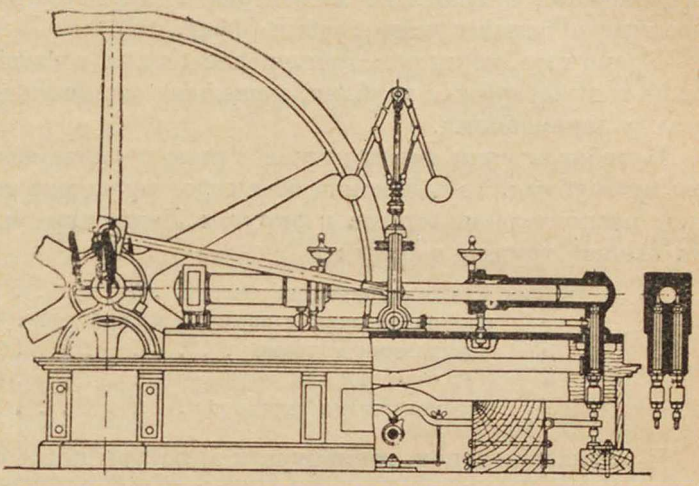
Но несмотря на разработанность конструкций Альбана и эти давления в 8—10 ата не нашли большего распространения и преобладающим

---

[1] Matschoss. Цит. соч., т. II, стр. 120. В некоторых современных журналах встречались указания даже в 70 и даже в 140 кг/см^2.

[2] C. Matschoss. Die Geschichte der Dampfmaschine, стр. 133.

типом продолжали оставаться машины низкого давления, хотя, по мере ознакомления со свойствами паров, все более и более выяснялись выгоды применения пара высокого давления.[1] Предложения Перкинса и Альбана машин особенно высокого давления не могли, конечно, иметь в то время успеха, так как общее состояние техники не соответствовало высоким требованиям, связанным с применением этого высокого давления: для этого нужны были другие материалы и другие методы обработки, необходимо было и большее знание свойств водяного пара и расчетов на прочность машинных частей. О работах Перкинса и Альбана вспомнили как раз через 100 лет, когда вопрос о применении пара особенно высокого давления (в 60 ата и выше) был поставлен действительно на практическую почву В. Шмидтом.



Фиг. 65

Паровые котлы для машин более высокого давления

Следует еще сказать несколько слов о котлах для машин высокого давления. В этом отношении особенно выделяются котлы Альбана, являющиеся одними из первых водотрубных котлов. Конструкция котла Альбана изображена на фиг. 66.

До Альбана предложения водотрубных котлов делались Стевенсом (1804 г.) и Тревитиком (1815 г.). и несколькими другими изобретателями в 20-х годах. Но предложение Альбана является наиболее технически разработанным: оно имеет вид почти современного водотрубного котла с трубами, имеющими небольшой уклон.

Но обыкновенно применялись те же конструкции котлов, как для

[1] Одним из горячих защитников машин высокого давления явился Араго, выступавший во французской палате депутатов 7 и 8 мая 1834 г. и 28 марта 1835 г. с горячей речью в пользу машин высокого давления, специально в приложении к судовым машинам (F. Arago, Oeuvres, т. V). В его сочинениях встречаются и другие выступления в том же смысле, например, в статье о взрывах паровых котлов имеется целая глава, посвященная доказательству положения, что паровые котлы высокого давления не более опасны, чем паровые котлы низкого давления, если соблюдаются правила предосторожности.

машин низкого давления (котлы цилиндрические и батарейные, с одной и двумя жаровыми трубами).

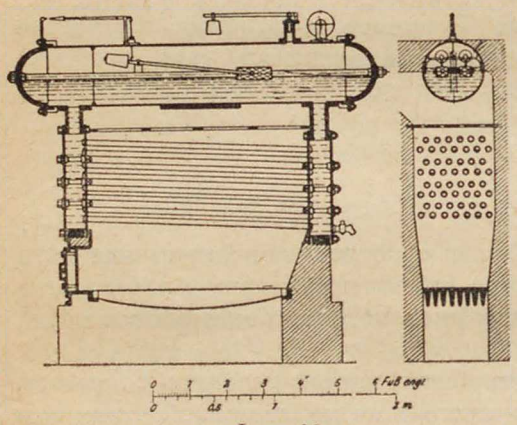
В котлах с жаровыми трубами нашли довольно широкое применение устройства с добавочными трубами, проходящими поперек жаровой трубы, предложенные английским инженером Галловеем (Galloway) — так называемые «Галловеевские трубки» (фиг. 67).

Кроме того, некоторое применение нашли в стационарной практике котлы с дымогарными трубами, нашедшие специальное примение в паровозах и локомобилях. [1]

Преобладающим типом котлов в этом периоде являлись котлы с жаровыми трубами. Так, до конца 50-х годов прошлого столетия проводится такое распределение котлов в округах Ланкашира и Иоркшира (соединяя схожие группы в одну):

Котлов Уатта «сундучного типа»	. . . . .	0,4 проц.
» цилиндрических с внешней топкой	. . .	5 »
» с жаровыми трубами	. . . . .	79,6 »
» с Галловеевскими трубками	. . . . .	6,5 »
» с дымогарными трубами	. . . . .	7,5 »

В отношении топок, гарнитуры и арматуры котла сделаны были некоторые успехи. Так, уже Уатт предлагал в патенте 1785 г. одну из конструкций для бездымного сгорания топлива, предлагались также топки с механическим передвижением (вроде позднейших цепных топок), а также ступенчатые топки для сжигания мелкого топлива. Делались также разные предложения автоматического регулирования действия топок и питания котла, не только не нашедшим широкого применения, но даже отвергавшиеся часто «по принципиальным» соображениям, характерным для рассматриваемого периода развития капитализма.



Фиг. 66

Фиг. 67

Эти соображения сводились к тому, что введение такой автоматизации в уход за котлом будет содействовать ослаблению внимательности кочегаров. Некоторые авторы того времени считали даже, что это облегчение работы кочегаров будет действовать на них «развращающим» образом.

Из приборов по уходу за котлами повсеместное применение нашли предохранительные клапаны, преимущественно нагруженные грузами;

[1] О них будет сказано дальше.

только в паровозах применялись пружинные предохранительные клапаны. Применялись иногда также предохранительные пробки из легкоплавких сплавов, служащие для тушения топки в случае отсутствия воды на поверхности котла, связанной с топкой. Эти пробки удержались затем долгое время в паровозной практике.

Для наблюдения за давлением применялись при котлах низкого давления ртутные манометры. Но при более высоком давлении применение их сделалось невозможным и прибегали к разным довольно неудобным и неточным способам изменения.

С предложением металлического манометра Бурдоном (в 1851 г.) эта трудность была устранена.

Пробные краны применялись, как мы видели, уже Папином. Водомерные стекла предлагались уже Уатттом, но первоначально не находили большого применения, так как стекла часто лопались, затем они постепенно вошли в употребление. Правила ухода за котлами и правила безопасности в начале рассматриваемого периода не были достаточно разработаны (как и вообще мероприятия по охране труда в этом периоде развития капитализма), хотя различные правительства и пытались издавать правила, касающиеся паровых котлов.

Только к концу рассматриваемого периода правила эти делаются более точными и рациональными. Один из первых авторов, обративших внимание на взрывы паровых котлов, на их причины и способы устранения был Араго. [1]

В большой работе (напечатанной в первом издании в журнале «Annulaire du Bureau des longitudes» за 1830 г.) он приводит описание большего количества взрывов котлов с указанием их причин. Он приводит также интересные сведения о французских законах относительно действия паровых котлов: законы 1810 и 1815 гг. касались только неудобств, вызываемых дымом от топок паровых котлов, закон 1823 г. предписывает некоторые правила безопасности только для котлов с давлением выше 2 атм. Более подробные правила 1828, 1829, 1830 и 1839 гг. тоже были совершенно недостаточными, и только правила 1843, 1844 и 1846 гг., явившиеся результатом работы специальной комиссии, дали достаточно полные указания по испытанию паровых котлов, уходу и надзору за ними. Заметим еще, что первый закон в России, касающийся паровых котлов, был издан в 1842 г. (Брандт «Очерк истории паровой машины», стр. 42).

Типы паровых машин специального назначения

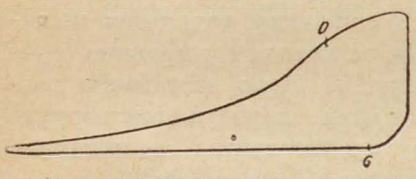
Как мы видели, одно из главных достижений Уатта заключалось в создании универсального двигателя, способного быть примененным в самых разнообразных областях промышленности. Но по мере расширения применения паровых машин появилась потребность приспособлять машины к специальным особенностям этих отдельных областей.

[1] F. Arago. Oeuvres, т. V.

В настоящем разделе мы дадим краткий обзор некоторых из этих специальных конструкций.

а) Водоподъемные машины. Водоподъемные машины были первыми, для приведения в движение которых паровая машина нашла себе применение. Особенное значение имели эти машины, как мы видели, для медных и оловянных копей в Корнвалиссе, вследствие большой глубины, с которой приходилось откачивать воду (а, следовательно, и больших мощностей соответствующих паровых машин) и дороговизны угля в этом районе, вызывавшей необходимость в крайне экономической машине.

Корнваллис был районом, где машины Уатта нашли особенно широкое применение и принесли ему чрезвычайно большой доход (в общем до 18 000 фунтов стерлингов). Поэтому Уатт и Болтон держали в Корнваллисе штат хороших инженеров для наблюдения за исправной работой этих машин; во главе этих инженеров стоял один из лучших сотрудников Уатта Мурдок. Когда истек срок патента Уатта, то эти инженеры были отозваны и машины предоставлены были надзору часто весьма невежественных машинистов, что повлекло за собой упадок этого парового хозяйства. Но с 1806 г. работой по приведению в порядок существующих машин и по созданию новых типов машин занялась группа талантливых инженеров во главе с Тревитиком и Вульфом, которые поставили Корнваллийскую машину на большую высоту и создали ей репутацию чрезвычайной экономичности. Для получения более благоприятных результатов в машинах этих стали применять более высокое давление и значительное расширение пара. Характер работы Корнвалийской машины виден из диаграммы, показанной на фиг. 68.



Фиг. 68

Машина имела диаметр равный 2032 мм и ход поршня равный 3050 мм. Давление впуска равнялось 3,47 атм. Закрывание паровпускного канала начиналось уже на $^1/_{20}$ хода поршня, и на $^1/_5$ хода поршня, в точке D, происходит закрытие впускного вентиля и начинается расширение пара.

Улучшение конструкции Корнваллийских машин повело к уменьшению расхода в них угля. С 1811 г. стали производиться точно наблюдения за работою этих машин инженером Лон (Loan). Он мерял количество воды и высоту ее подъема и относил совершенную работу подъема к расходу угля в бушелях (причем в отличие от Тревитика и Уатта [1] принимал вес бушеля равным 94 англ. фунт.). Отношение работы в машинах фунтофутов на 1 бушель угля он назвал «duty» («производительность» или «продуктивность»). [2]

---

[1] Мы уже говорили об этой неопределенности в применяемых единицах.

[2] Многочисленные данные о расходе угля в водоподъемных машинах в разные эпохи их развития имеются также у П. К. Худякова. «Паровые насосы», Москва, 1899.

Таблица 3

Годы	Число исслед. машин	Средняя производ. всех исслед. машин		Производительность лучших машин	
		Мил. фунто-фут. на бушель угля	Тонномет-ры на 1 кг угля	Мил фунто-фут. на бушель угля	Тонно-метры на 1 кг угля
1812	21	19,3	62,6	—	—
1815	35	20,5	66,5	28,7	93,0
1818	36	25,4	82,3	39,3	127,2
1821	45	28,2	91,4	42,8	138,6
1824	49	28,3	91,6	43,5	141,0
1827	51	32,1	104,0	59,7	183,2
1830	56	43,3	140,0	78,0	253,0
1832	59	45,0	146,0	85,0	275,0
1835	51	47,8	155,0	91,7	287,8
1838	61	48,7	157,5	84,2	272,2

Если взять даже среднюю величину для 1838 г., то получится использование тепла равное

$$\frac{157\,500 \cdot 100}{8000 \cdot 427} = 4{,}6\,\%,$$

а для наилучших из приведенных данных получится использование тепла

$$\frac{287\,800 \cdot 100}{8000 \cdot 427} = 8{,}4\,\%$$

величина использования, которая была достигнута только значительно позднее в других паровых машинах.

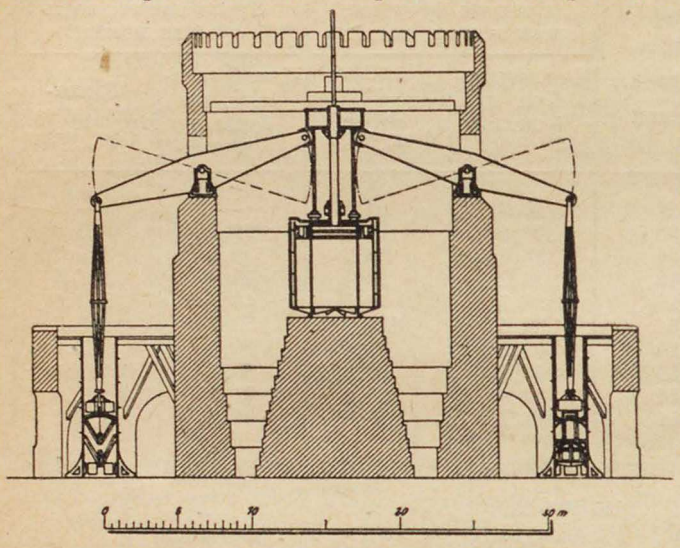
Заметим, что С. Карно в своем знаменитом сочинении, [1] вышедшем в 1824 г., приводит следующие цифры об одной из машин в Корнваллисе: подъем 56 000 000 фунт. воды на высоту 1 фута при сжигании одного бушеля угля, причем один бушель угля принимается равным 88 англ. фунт. Это дает работу в 195 000 кгм на 1 кг сожженого угля. Карно оговаривается, что этот результат совершенно исключительный и относится к лучшей из известных Карно машин. У Тредгольда [2] приведена таблица для нескольких копей в Корнваллисе с указанием размеров машин и их производительности по опытам, сделанным в 1826 г. Производительность этих машин доходила до 137 000 кгм на 1 кг сожженного угля. Корнваллийские машины строились по одному типу в виде одноцилиндровых балансирных машин простого действия. Наибольшее применявшееся давление было равно 3,86 атм, самые большие размеры — диаметр 2286 мм, ход поршня 3650 мм, число двойных ходов в минуту около 10. Наибольшая глубина, с которой подымалась вода, равнялась 650 м.

Кроме балансирных машин Тревитик предлагал применять и прямодействующие машины и преодолел при этом большие конструктивные затруднения, но эти машины не получили большого распространения.

[1] Сади Карно. Размышления о движущей силе огня. Русский перевод в серии «Классики естествознания», Госиздат, 1923, стр. 62. Об этой книге мы будем говорить дальше.

[2] Тредгольд. Цит. французский перевод, стр. 415 и след.

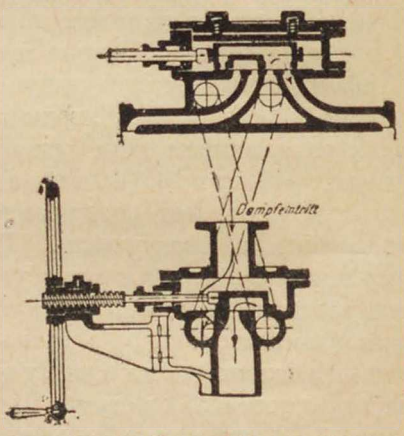
Кроме откачивания воды из копей, водоподъемные машины находили большое применение для городских водопроводов. В них мы тоже встречаем, главным образом, балансирные машины простого действия (похожие по типу на Корнваллийские машины), но позже стали применяться и машины с непрерывным вращательным движением. [1]



Фиг. 69

Техника конструкции водоподъемных паровых машин настолько развилась, что удалось применить их в 1845—1852 гг. для знаменитого в истории техники предприятия — осушения Гарлемского залива (в Голландии), для чего были применены тоже балансирные машины английской конструкции [2] двойного расширения простого действия огромных размеров (цилиндр низкого давления имел диаметр, равный 3660 мм и ход поршня, равный 3450 мм, вес цилиндра в одной отливке был равен 22 т).

Движение поршня сообщалось 11 балансирам, расположенным веерообразно и действующим на 11 насосов, каждый длиною по 1,6 м и весом в 6200 кг. Разрез башни с такой машины показан на фиг. 69.



Фиг. 70

Штоки поршня соединены сверху тяжелым грузом (22 т), действующим как движущая сила при ходе поршня вниз. В 1849 г. там же были поставлены еще другие машины, несколько видоизмененного устройства. Производительность этих машин была равна 226 970 до 243 183 кг на 1 кгм угля.

б) Шахтные подъемные машины. Применение паровых машин к шахтным подъемным устройствам началось еще со времени

[1] Имеется пример такой машины, построенной для водопровода Филадельфии уже в 1800 г. (на заводе Рузвельта).

[2] Описание имеется в «Allgemeine Bauzeitung», 1865.

атмосферной машины, но более широкое применение паровых машин для этой цели начинается только с 1800 г. Первоначально все такие машины устраивались в виде балансирных двойного действия с зубчатой передачей к барабану, на который навивается канат, служащий для подъема.

Барабан этот имел всегда вертикальную ось. Одновременно с водоподъемными машинами начало применяться высокое давление и в шахтных подъемных машинах; в Англии инициатором применения более высокого давления явился опять-таки Тревитик, в Бельгии — Коккериль. Но затем произошла реакция, и машины эти стали вновь работать на невысоком давлении без конденсации. Это возвращение к невысокому давлению объясняется тем, что машины эти работали часто вообще без расширения (вследствие особенностей своего парораспределительного механизма), а при такой работе применение более высокого давления не приносит большой выгоды.

Отличительной особенностью шахтных подъемных машин является необходимость сообщить им движение с переменным направлением. Поэтому главной отличительной особенностью шахтных подъемных машин является именно устройство для изменения направления вращения. Эта задача встретилась в паровозах, пароходах и прокатных машинах (при станах дуо). В области паровозных и пароходных паровых машин с их золотниковым парораспределением задача изменения направления вращения («реверсивности») решалась помощью применения разного рода к у л и с с (о которых мы будем говорить дальше). В области же шахтных подъемных машин преобладали более простые устройства: поворотные эксцентрики (свободно сидящие на валу), передвигаемые посредством рычага, передвижные шайбы с кулаками и др. В малых подъемных машинах применяли и изменение направления вращения посредством особого добавочного золотника, как показано на фиг. 70.

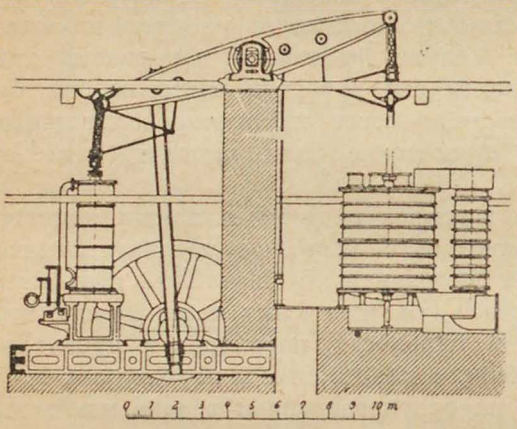
Передвижение этого золотника изменяет направление движения пара.

Первоначальные ставившиеся балансирные подъемные машины заменились в 40-х и 50-х гг. при больших мощностях горизонтальными машинами с клапанными распределениями, причем клапаны эти управлялись часто кулиссами. Позже (в 50-х и 60-х гг.) для приведения в движение клапанов стали применяться кулиссы и кулачные шайбы, которые и в настоящее время являются преобладающим типом распределений для подъемных машин.

в) В о з д у х о д у в н ы е м а ш и н ы. Воздуходувные машины являлись одной из первых областей, в которых, как мы видели, паровые машины нашли приложение (в предложениях Смитона и Ползунова). Первоначально в воздуходувных машинах применялась тоже конструкция с балансиром, на одном конце которого ставился паровой цилиндр, а на другом конце — воздуходувный цилиндр.

Конструкция эта долго являлась преобладающей. Пар работал в цилиндре паровой машины без расширения, что давало большой расход пара и угля, об экономии в расходе угля в то время в металлургических

предприятиях не особенно беспокоились, так как для получения пара хватало тепла, даваемого доменными газами (утилизация которых началась уже с давнего времени). Попытки применения расширения встречали затруднение в неравномерности движущего усилия в паровом цилиндре, по характеру своему не совпадающем с неравномерным же усилием в воздуходувном цилиндре. Для смягчения этих несовпадений в воздуходувных машинах стали часто применять конструкцию машин Вульфа с расположением двух воздуходувных цилиндров непосредственно над паровыми. В Англии, где принята была система снабжения нескольких доменных печей от одной воздуходувки, получались колоссальные размеры воздуходувок; так, например, в одной из машин, поставленных в Шотландии, паровой цилиндр имел диаметр и ход поршня равные 10 фут. (3048 мм), причем машина делала 18 двойных ходов в минуту. Таким образом, средняя скорость поршня у нее получалась равной 1,82 м/сек.



Фиг. 71

При громадных массах, движущихся взад-вперед, эта скорость является слишком большой. Стремление избежать затруднений при таких больших скоростях, а также желание уменьшить размеры воздуходувок помощью применения еще больших скоростей повело и в области воздуходувных машин к применению сначала балансирных же машин, снабженных маховиком. Одна из таких английских машин, поставленная в 1851 г., показана на фиг. 71.

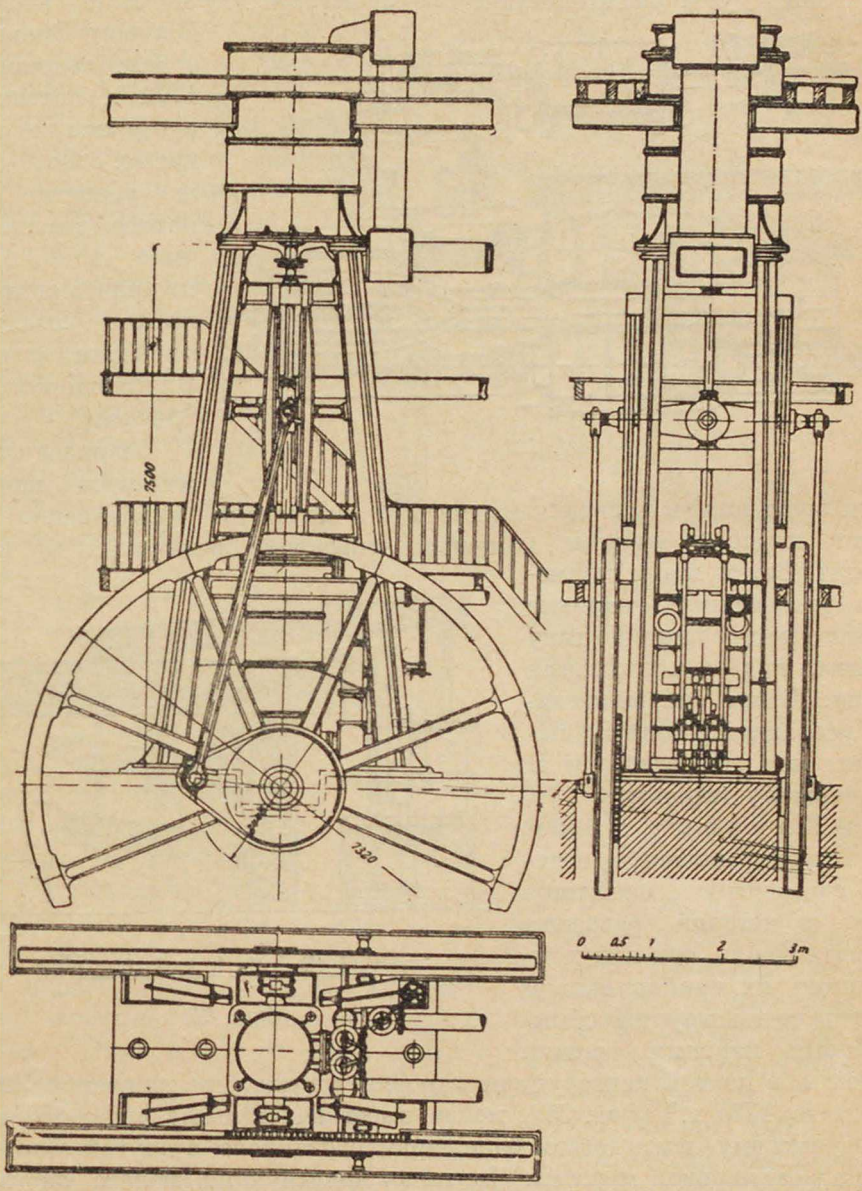
Размеры ее, впрочем, еще более велики, чем ранее приведенной: диаметр и ход воздуходувного цилиндра равны 12 фут. (3660 мм), число оборотов —20 в минуту, количество подаваемого воздуха — 44000 куб. фут. в минуту (1246 м³/мин), давление — 0,23 атм. Размеры парового цилиндра были: диаметр — 1347 мм и ход поршня — 3960 мм. Мощность этой машины около 650 л. с.

Дальнейшим шагом в направлении увеличения скорости движения воздуходувных машин был отказ от балансира и переход к прямодействующим паровым машинам с непрерывным вращательным движением.

В создании таких машин особое значение получил завод Коккериля в Серенге (Бельгия) и завод Шнейдер-Крезо во Франции. Тип машины Коккериля (построенный по проекту главного конструктора завода инженера Бриальмона) изображен на фиг. 72.

В 50-х г. прошлого столетия во Франции и Германии стали строиться также горизонтальные воздуходувные машины. Пример сдвоенной

горизонтальной воздуходувной машины немецкой конструкции конца 40-х гг. показан на фиг. 73.

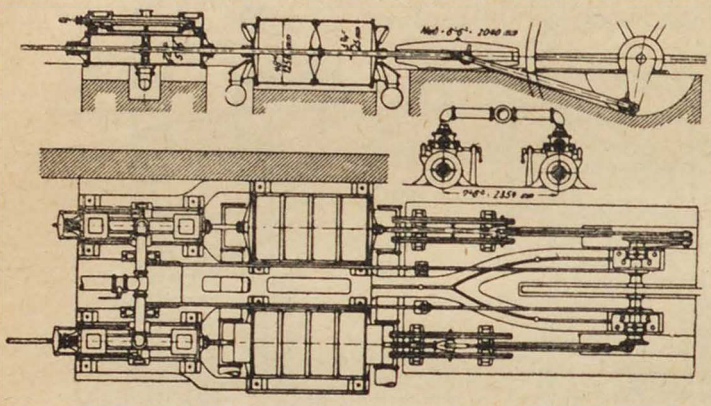


Фиг. 72

Такие машины были дешевле, чем вертикальные машины одинаковой мощности.

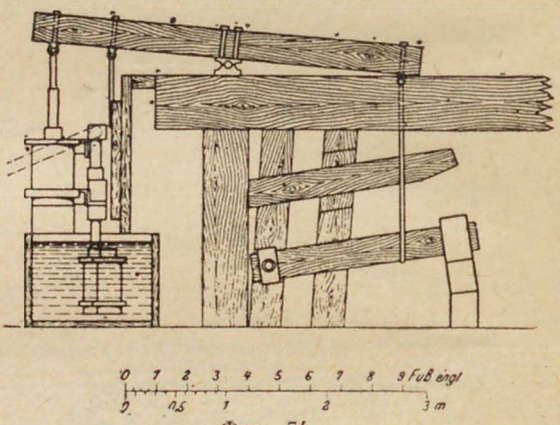
г) П р о к а т н ы е м а ш и н ы. Прокатные машины в продолжение

всего рассматриваемого периода мало отличались от других фабричных машин. Прокатка была введена Кортом для пудлинговых криц; дальнейшие усовершенствования в прокатное дело было введены Джоном Вилькинсоном, взявшим в 1792 г. патент на реверсивную прокатку. Особенное же развитие прокатное дело получило в 30-х гг. прошлого столетия после введения прокатки рельсов Биркиншоном (Birkinshon). [1]



Фиг. 73

Первоначально изменение направления вращения в вальцах делалось без изменения направления вращения паровой машины помощью включения различных зубчатых передач. Затем стали применять реверсивные паровые машины, построенные по типу шахтных подъемных паровых машин. Более самостоятельное развитие прокатных паровых машин относится к позднейшему периоду.



Фиг. 74

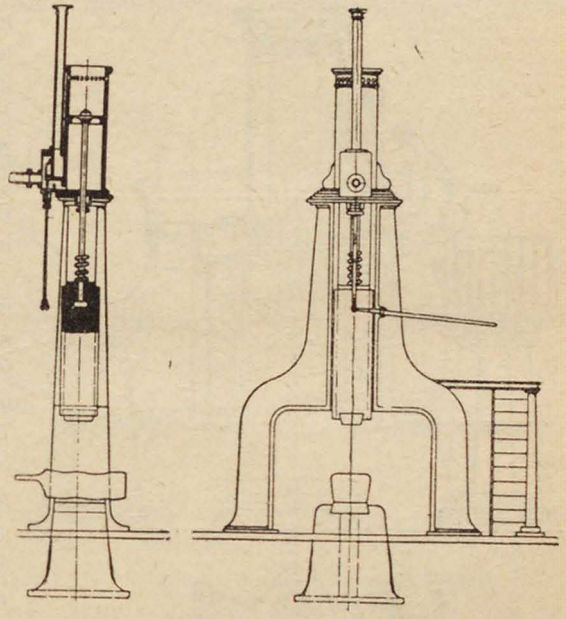
д) Паровые молоты. Паровые молоты занимают совершенно особенное место в истории развития паровых машин, так как конструкция их принципиально отлична от конструкции обыкновенных паровых машин. Впрочем, в первой конструкции парового молота, предложенной Уаттом в патенте 1784 г.[2] (фиг. 74), молот имеет качательное движение и оно передается ему посредством балансира, связанного с другой стороны с цилиндром паровой машины. Но такая конструкция молота оказалась впоследствии совершенно неудобной; нужно было создать прямодействующий молот для разрешения возросших по трудности задач железообрабатывающей промышленности. Эта задача разрешена была Джемсом

[1] Beck. Geschichte des Eisen, т. 3.

[2] Пункт 5 патента от 28 апреля 1784 г. В самом патенте говорится о возможности прямой передачи от цилиндра паровой машины или о передаче посредством балансира.

Нэсмитом, тоже одним из крупнейших английских инженеров. [1] Поводом к занятию задачей о паровом молоте послужило для Нэсмита письмо инженера Гемфри (от 24 ноября 1839 г.), работавшего в Великобританском пароходном обществе, в котором он жаловался на невозможность получить на английских заводах откованную железную ось для нового колесного парохода.

В виду этого Гемфри предлагал сделать эту ось из чугуна.[2] Нэсмит очень быстро пришел к заключению о необходимости создания молота с вертикальным падением его на наковальню (подобно тому, как это делается в коперах для заколачивания свай). Тогда же Нэсмит составил вполне законченный эскиз прямодействующего молота. [3] Но осуществление его замедлилось, так как временно потребность в больших осях ослабела, в виду перехода пароходов на работу помощью гребных винтов (первоначально не требовавших особенно больших поковок); кроме того, общее хозяйственное положение Англии было неблагоприятно и не позволяло промышленникам думать о затратах на новые сооружения. В 1840 г. известный французский заводчик Шнейдер вместе со своим главным инженером Бурдоном посетил завод Нэсмита, ознакомился с его проектом парового молота и по возвращении во Францию на своем заводе в Крезо построил такой молот, который стал работать вполне удовлетворительно. В 1842 г. сам Нэсмит посетил завод Крезо и ознакомился с работой этого молота и по возвращении в Англию взял там патент (9 июля 1842 г. за № 9382) на это изобретение. Молот Нэсмита в простейшей форме изображен на фиг. 75.



Фиг. 75

Распределение пара делается простым золотником от руки. Впускаемый пар подымает поршень вместе с бойком молота. По достижении молотом верхнего положения золотник передвигается и пар получает

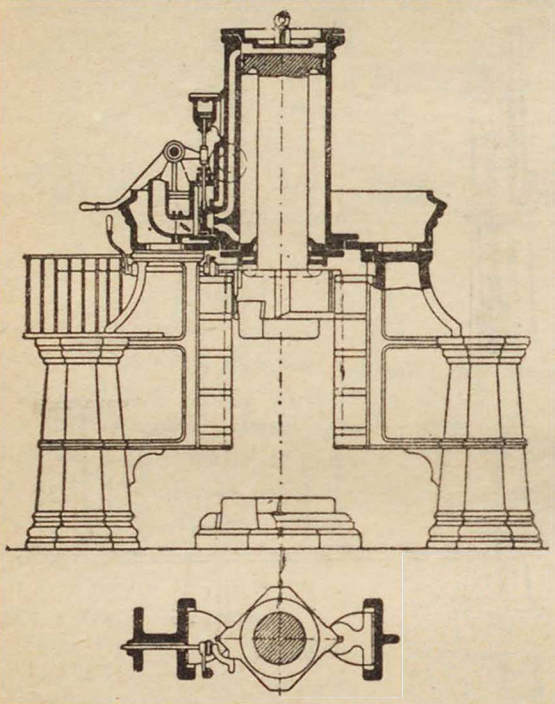
[1] Довольно полные биографические сведения о Несмите имеются у Смайльса. См. цит. соч., гл. XV. История его изобретения рассказана в «Z. d. VDI.», стр. 203, 1863 и « Engineer», т. 1, стр. 406, 1890.

[2] Намерение явно совершенно нецелесообразное.

[3] Эскиз этот первоначально был напечатан в журнале «Engineer», т. 1, стр. 406, 1890.

свободный выход наружу, вследствии чего молот падает под влиянием собственного веса. В первоначальную конструкцию был внесен ряд усовершенствований — прежде всего автоматическое пароораспределение.

Почти одновременно с Нэсмитом молот стали строить прочие конструкторы во Франции (кроме Шнейдера, Каве и др.) и Германии (Дорнинг и др.). Принципиально отличную конструкцию от Нэсмитовской предложил Конди (Condie, патент от 15 октября 1846 г.); в конструкции этой поршень задерживается, а боек соединен с подвижным цилиндром. Достоинством этой конструкции выставлялось использование большого веса цилиндра, как часть веса бойка. Но иметь подвижной цилиндр, подверженный сильным ударам — явно нецелесообразно и конструкция эта не удержалась на практике.



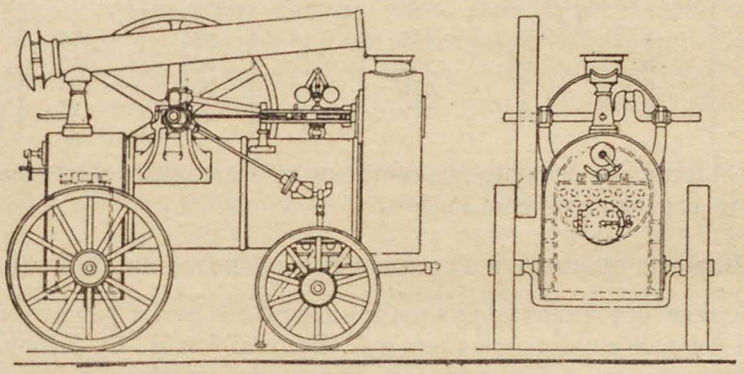
Фиг. 76

Большее значение получили предложения Делена(1852 г.) при движении поршня вниз усиливать действие веса путем перепуска пара наверх (фиг. 76), а также применение свежего пара при движении молота вниз (молота с «верхним паром»). Последняя конструкция предложена была Нейлором в 1857 г. Наконец, в начале 60-х годов были предложены также горизонтальные молоты Рамсботтомом (для небольших поковок), а также быстроходные вертикальные паровые молоты, созданные Шварцкопфом.

Таким образом, за 20 лет (с 1842 и по начало 60-х годов) созданы были все основные типы паровых молотов и в позднейшие годы были сделаны только некоторые конструктивные усовершенствования и особенно увеличены размеры молотов: в то время как молоты 40-х и 50-х годов имели вес самого молота порядка 4—5 т, в позднейшие годы, в виду чрезвычайного увеличения объема и веса поковок, вес этот стал доходить до многих десятков тонн.

е) Локомобили. Мы видели,что уже Смитон устраивал передвижные машины (около 1765 г.). Позже (1811—1812 гг.) Тревитик предлагал передвижные машины для применения в сельском хозяйстве (в соединении с молотилками). Но в то время спрос на эти машины был мал; Тревитик вскоре оставил намерение организовать постройку этих машин и занялся, как мы видели, производством машин высокого давления.

Потребность в паровом двигателе для сельского хозяйства стала ощущаться более сильно в Англии в начале 40-х годов прошлого столетия. Вопросом о создании и применении сельско-хозяйственного локомобиля занялось незадолго около того времени основанное «Английское сельскохозяйственное общество» («The Royal Agricultural Society»). На своих ежегодных выставках это общество допустило вскоре локомобили, и около 1847 г. производство локомобилей стало принимать заметные размеры. После нескольких разнообразных конструкций (причем применялись машины с качающимся цилиндром и вертикальные) создался



Фиг. 77

тип более или менее нормального локомобиля с котлом, с дымогарными трубами и горизонтальной машиной, помещенной на котле. Производством этих машин занялся с 1848 г. специальный английский завод Клейтона и Шютльворт, приобревший вскоре всемирную известность в этом производстве. Нормальная конструкция этого завода изображена на фиг. 77.

Вскоре занялись производством локомобилей еще другие английские фирмы: Горнсби, Рансом и Симс. Фирмы эти соединяли с производством локомобилей производство сельско-хозяйственных машин, для приведения в движение которых и применялись преимущественно локомобили. Во Франции и Германии не было условий, достаточных для создания специальных локомобильных фабрик, и производством их занимались некоторые заводы, изготовлявшие вообще паровые машины.

Английские локомобили строились небольших мощностей—преимущественно от 4 до 8 л. с. (редко 10 л. с.). Нормальные размеры локомобилей 50-х годов показаны в таблице (см. стр. 116).

Отсюда видно, что локомобили были по тому времени настоящими быстроходными двигателями.

Давление, применявшееся в локомобилях того времени, равнялось первоначально 45 англ. фунт. на 1 дм² (3,16 атм.), а затем — 50 англ. фунт. на 1 дм² (3,5 атм.). Иногда применялись и более высокие давления.

За нормальный хороший расход угля в 50-е годы применялось в локомобиле 7 англ. фунт. на эффект. л. с. ч. $\left(3{,}17\frac{\text{кг}}{\text{эфф. л. с. ч.}}\right)$. При «па-

Таблица 4

Мощность л. с.	Диаметр цилиндра		Ход поршня		Число оборотов в минуту
	в дм	в мм	в дм	в мм	
4	6	152	10	254	150
5	6	152	12	305	140
6	7	178	12	305	135
8	9	229	12	305	125

радных» опытах на сельско-хозяйственных выставках общества получались часто гораздо меньшие цифры.

Паровая машина в России в первой половине XIX века

Главными источниками для истории ранней эпохи развития машиностроения в России являются статьи А. Ершова [1] и Н. Ф. Лабзина. [2] Сведения, приведенные в этих обзорах, далеко недостаточные: они дают сведения скорее по промышленной статистике, чем по истории техники. Одна из главных задач историко-техники в России есть пополнение материала, содержащегося в этих обзорах новыми сведениями чисто технического характера. В настоящее время, однако, эти обзоры являются все же наиболее систематичным собранием материалов по развитию машиностроения в рассматриваемом периоде, так как кроме них имеются только некоторые журнальные статьи, касающиеся отдельных вопросов. Материалы, имеющиеся в статьях Ершова и Лабзина использованы и в истории паровой машины А. А. Брандта.

Мы уже говорили о влиянии английского машиностроения на возникновение постройки машин на русских заводах. Одним из первых деятелей в области машиностроения в России был шотландский уроженец Гаскойн, выписанный Екатериной II. Гаскойн (сам работавший раньше на Карронском заводе) привез с собой несколько английских инженеров и мастеров и поставил чугунно-литейное и механическое производство на Олонецких заводах. На одном из этих заводов (Александровском в Петрозаводске) была построена в 1790 г. первая в России паровая машина (если не считать машины Ползунова).

Машина эта была построена по типу машины Уатта и предназначена была для отлива воды на Воицком золотом прииске.

[1] А. Ершов. Обзор машиностроительных заведений в России. Также обзор различных отраслей мануфактурной промышленности России, т. 2. СПб. 1863.

[2] Н. Лабзин. Машины и аппараты. Историко-статистический обзор промышленности России, т. II. СПб, 1886.

Дальнейшему развитию машиностроения в России и даже развитого применения машин мешали мероприятия английского правительства в конце XVIII в. и начале XIX в., сильно стеснявшие (и иногда даже запрещавшие) вывоз машин из Англии; в 1783 г. был запрещен даже выезд мастеров из Англии из опасения развития самостоятельного машиностроения в других странах. Однако, после окончания Наполеоновских войн (в 1815 г.) мероприятия эти стали смягчаться: сначала был разрешен вывоз общих машин и частей машин; эти меры в значительной мере ослабили значение оставшихся запрещений. Окончательная же отмена всяких запрещений вывоза машин из Англии была проведена только в 1843 г. К этому времени уже в большинстве стран было давно поставлено собственное машиностроение, часто при содействии мастеров и инженеров, выехавших из Англии (Максон, Вильсон, Берд, Эдвардс, Диксон, Коккериль).

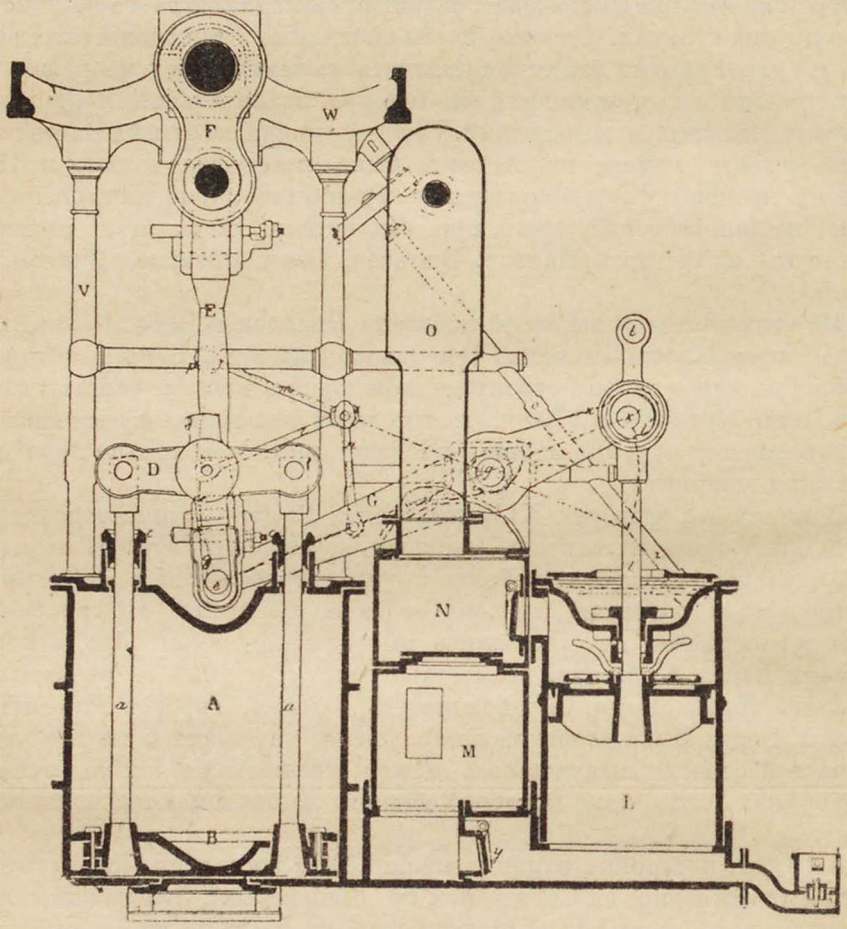
Из этих деятелей в России работали Вильсон и Берд. Первый продолжал деятельность Гаскойна (умершего в 1806 г.). Берд, о котором мы упоминали как о первом строителе пароходов в России, основал свой завод в Петербурге еще в 1790 г., и этот завод был долгое время единственным, строившим паровые машины в России, притом не только пароходные, но и стационарные.

К концу I-й четверти XIX столетия в России начинает развиваться текстильная промышленность (хлопчато-бумажная, шерстяная и льняная), начавшая предъявлять более крупные требования на машины и содействовавшая развитию машиностроения в России. Но русские машины того времени не отличались высоким качеством. Так, о паровых машинах Берда А. Ершов отзывается так: «До 1840 г. работы Берда считались образцовыми. Справедливость, однако, требует заметить, что машины Берда были необыкновенно тяжелы и громадны, но это утолщение частей отчасти вынуждалось невежественным уходом за машинами на фабриках, вследствие которого машины часто ломаются и скоро портятся».

В 1836 г. постройка паровых машин была поставлена на Выксунских заводах (собственно, на Сноведском бр. Шепелевых). Эти машины шли на текстильные фабрики Владимирской губ., но часто не выдерживали конкуренции с иностранными машинами и заменялись ими. Выксунские заводы строили машины системы Уатта низкого давления с балансиром. Паровые машины строили и некоторые другие заводы: Александровский чугунно-литейный и механический завод в Петербурге (игравший впоследствии крупную роль в развитии паровозостроения в России, о чем мы будем говорить позже), несколько заводов для постройки пароходов (например, Сормовский, основанный в 1849 г., завод Шиповых в Костроме и др.). Постройкой паровых машин занялись также Мальцевские заводы (в Жиздренском уезде Тульской губ.):заводы эти строили и пароходы и стационарные машины; Людиновский завод Мальцева начал позже даже постройку локомобилей.

Однако, большинство паровых машин все же вывозилось из-за

границы. Распространение судовых паровых машин даже в русском военном флоте было невелико: ко времени Крымской войны в Балтийском флоте было только несколько колесных пароходов, винтовых же судов (которыми располагали союзники) у нас вовсе не было.[1] Поэтому во время



Фиг. 78

войны пришлось спешно заняться постройкой винтовых военных судов (преимущественно канонерок), что и было исполнено некоторыми петербургскими заводами (Александровским, Кронштадским, Нобеля [2] и др.); но окончены были эти работы уже после завершения войны.

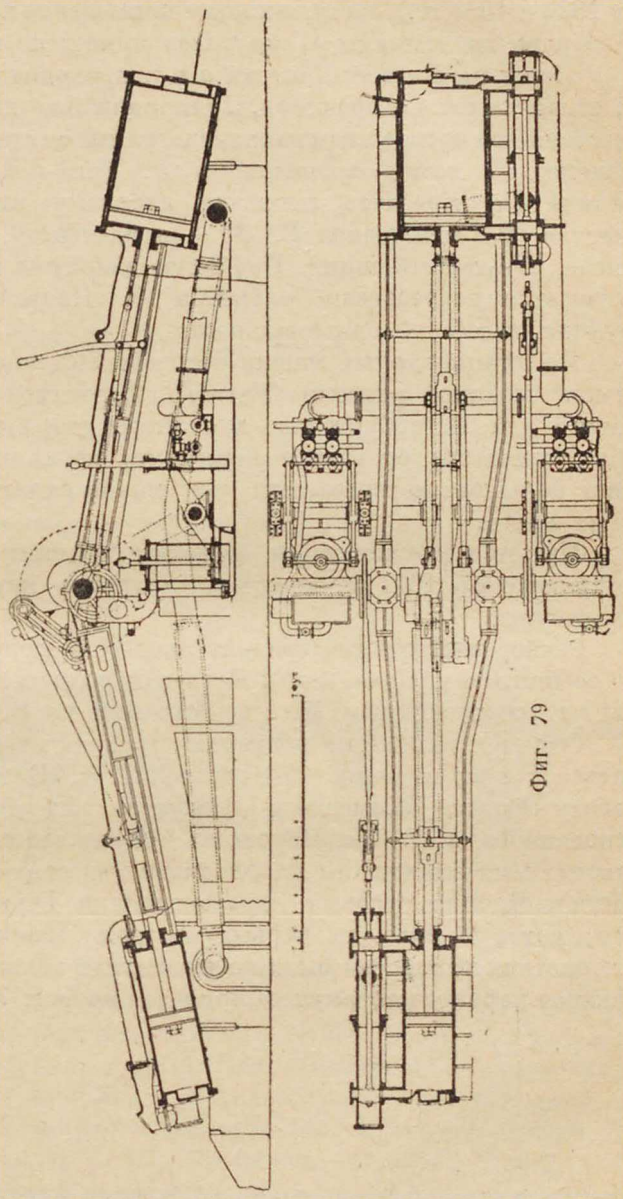
---

[1] Ко времени начала Крымской войны в русском военном флоте было всего 446 военных судов разного наименования; из них паровых было только 65; из последних две трети были построены в Англии. См. Лабзин. Цит. соч., стр. 21.

[2] Механический завод Людвиг Нобель. Петербург, 1912, стр. 3. Всего за это время (14 месяцев) построено было петербургскими заводами 105 паровых машин, общей мощностью около 1500 л. с. Лабзин. Цит. соч., стр. 21.

О слабом развитии до эпохи Крымской войны железнодорожного дела и паровозостроения мы будем говорить в главе III этого же периода.

Этих кратких сведений о построении и распространении паровых машин в России в первой половине XIX в. достаточно, чтобы убедиться в слабом развитии этого дела: общие условия натурального крепостного хозяйства и слабое развитие промышленности вообще не давали возможности утвердиться и получить широкое значение этой отрасли машиностроения. Это низкое состояние машиностроения вообще и постройки паровых машин в частности имело свои специальные причины: низкий таможенный тариф на машины, недостаток добычи железа и малое разнообразие сортов его, производимых в России, и запрещение привоза чугуна и железа морем.[1] Разбор этих условий не входит в нашу задачу.



Фиг. 79

Из данных технического характера о машинах, построенных в России, можно упомянуть о машине прямого действия (т. е. не балансирной), построенной Ижорским заводом для парохода «Геркулес» в 1832 г. В Англии хотя отдельные попытки построения прямодействующих машин для пароходов делались и раньше

[1] До тарифа 1857 г. чугун и железо были запрещены к привозу из-за границы морем, а машины и аппараты, употребляемые на фабриках и заводах, допускались к беспошлинному ввозу. Лабзин. Цит. соч., стр. 17.

(в 1822 и 1826 гг.), но их широкое применение началось только в 1839 г. Изображение машины «Геркулеса» приведено на фиг. 78.

Поршень B имеет 2 штока a и a, проходящих через сальники (c и c) и связанных с поперечиной. Прямолинейное движение поперечины осуществляется посредством параллелограмма с тягами m, r и n, имеющего неподвижную точку вращения в P. Тяга d d, прикрепленная к поперечине D, передает движение главному валу машины посредством шатуна E и кривошипа F. M — конденсатор, L — мокровоздушный насос, N—теплый ящик. Передача движения к воздушному насосу совершается посредством балансира G. Нельзя отрицать в этой конструкции известной оригинальности.

Из стационарных машин того времени следует упомянуть о сооружении машины системы Уатта, построенной Кларком на Олонецком заводе для Петербургского монетного двора мощностью в 60 л. с. [1] Она отличается большими размерами, но по конструкции не представляет большого интереса, так как вполне схожа с обыкновенными машинами Уатта.

Имеются еще некоторые сведения о машине, построенной Меджером, получившим в 1812 г. поручение устроить механический завод в Екатеринбурге. [2]

Речное пароходство сравнительно рано получило развитие на Волге и ее притоках (Каме, Оке). Первые пароходы появились на Волге уже в 1817 г. (построенные на Пожевском заводе на Волге В. А. Всеволожским).

Однако в крупных размерах пароходство на Волге начинает развиваться только в конце 40-х годов XIX в. В 1847 г. там начали свою работу «Волга», «Самсон» и «Геркулес» Общества пароходства по Волге, основанного в 1843 г. Пароходы эти построены были в Голландии на заводах Нидерландского пароходного общества известным деятелем в области постройки судовых паровых машин Гергардтом Морицем Рентгеном, который один из первых построил машины системы компаунд. [3] Эта система применена была на указанных волжских пароходах. Чертеж машины парохода «Геркулес» приведен на фиг. 79.

---

[1] К л а р к. О паровых машинах вообще с присовокуплением чертежа силою против 60 лошадей, устроенной при С.-Петербургском Монетном дворе, Горн. журн., кн. X, 1826.

[2] К. А. С к а л ь к о в с к и й. О значении царствования императора Александра I в истории русского горного дела, Горн. журн., кн. 1, 1878. К р а ф т. О Меджеровой паровой машине, Техн. журн., т. II, 1805.

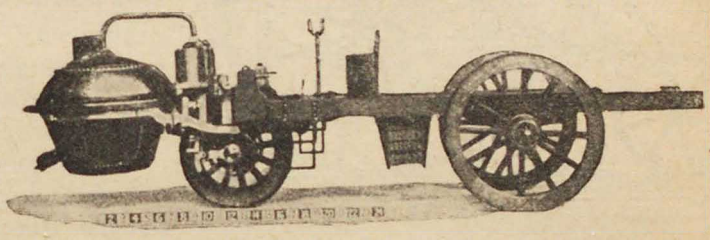
[3] А. А. Б р а н д т. Очерк истории паровой машины, Стр. 57 и след. А. А. Б р а н д т. Столетний юбилей пароходного дела в России, «Теплоход», 1917.

Глава III

СОЗДАНИЕ ПАРОВОЗА

Паровые повозки на обыкновенных дорогах [1]

Идея применить паровую машину к сухопутному транспорту очень стара: ее высказывали уже Папин и Севери, о ней вел также переговоры с Уаттом его друг доктор Робисон. Но первое осуществление этой идеи принадлежит французскому инженеру Кюньо (Cugnot), построившему в 1769 г. паровую повозку, предполагая применить ее для военных целей (перевозка тяжелых орудий). Повозка Кюньо сохраняется в настоящее время в Париже в Conservatoire des Arts et des Métiers. В 1770 г. он выработал тип повозки, предназначенной вообще для перевозки тяжестей (предполагалась грузоподъемность около 4,5 т при скорости в 4 км в час на горизонтальном пути). Повозка Кюньо изображена на фиг. 80.



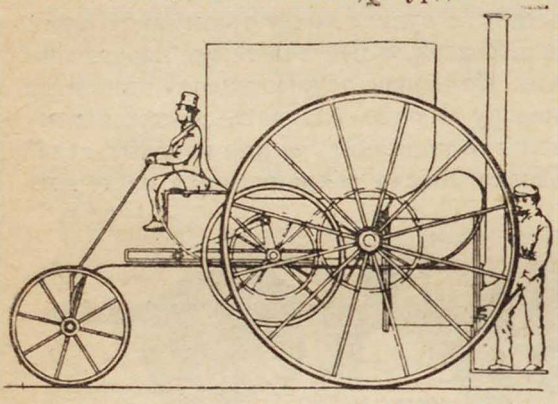
Фиг. 80

Как видно из этого изображения, повозка трехколесная (переднее колесо несколько меньше двух задних). Котел имеет форму обыкновенного кухонного котла с внутренней топкой. Паровая машина — без конденсации, т. е. должна была работать при сравнительно высоком давлении; паровых цилиндров — 2, простого действия (как в проекте машин Леупольда, изображенном на фиг. 12). Движение поршней передавалось к переднему колесу помощью рычагов и кривошипа. Однако, конструкция Кюньо оказалась неудовлетворительной: котел был слишком слаб для машины, пара не хватало, повозка не могла ехать с предположенной скоростью; вообще она была слишком тяжела и неповоротлива, оказалась непригодной и опыты с ней скоро были оставлены.

[1] Сведения об этих ранних попытках создания парового транспорта имеются в обоих сочинениях Матчосса, у Терстона, а также у Рюльмана (R u h l m a n n. Allgemeine Maschinenlehre, B. III., Braunschweig, 1868) и в статье Матчосса (Zeitschrift d. VDI, 1906).

Почти одновременно с Кюньо, в Америке начал заниматься вопросом о паровом экипаже для обыкновенных дорог Оливер Эванс. Работы его в этом направлении начались еще в 1772 г. в связи с его же занятиями паровой машиной высокого давления (об этом мы говорили выше). Однако, патент на паровой экипаж он получил только в 1787 году, осуществить эту идею ему удалось только в 1803—1804 гг. Но осуществление идеи Эванса тоже практического успеха не имело. Также мало успеха имело предложение американца Джека Рида, взявшего патент на паровую повозку в 1790 г.

В Англии применение паровой машины к передвижению повозок было оговорено в патенте Уатта 1784 г., но каких-либо практических шагов для осуществления своих предложений в этом направлении он не делал. Сотрудник Уатта, Мурдок тоже сконструировал в 90-х годах XVIII столетия паровую повозку и построил даже несколько моделей своего изобретения, но не встретил поддержки Уатта и Болтона, которые видели в этих занятиях Мурдока только нежелательное отвлечение своего талантливого сотрудника от его непосредственной работы над стационарной паровой машиной.



Фиг. 81

Обыкновенно настоящее практическое осуществление парового автомобиля (применяя современный термин) связывается с именем Тревитика, которому действительно удалось в начале XIX столетия (1801 — 1802 гг.) построить паровой экипаж, значительно превосходящий все предыдущие попытки этого рода. [1]

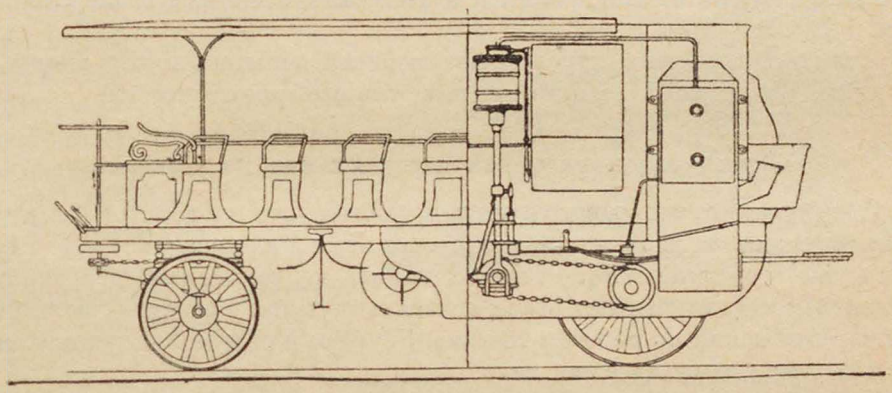
Паровой автомобиль, построенный Тревитиком в 1802 г. изображен на фиг. 81.

Котел и машина помещаются между большими задними колесами (2,4 м). Цилиндр — горизонтальный: передача от крейцкопфа к колесам сделана при помощи шатуна, кривошипа и зубчатых колес. Автомобиль этот мог перевозить от 8 до 10 человек, со скоростью 8—9,6 км (доходившей в исключительных случаях до 16 км). Автомобиль Тревитика возбудил к себе большое внимание в Лондоне, но состояние дорог было настолько плохо, что автомобиль этот быстро приходил в расстройство и Тревитик вскоре прекратил свою работу над ним и занялся конструированием локомотива для передвижения по рельсам (о чем мы будем говорить дальше).

Однако неудача Тревитика не остановила работы других изобретателей. Эта работа стала особенно интенсивной в 20-х годах XIX столетия

[1] В работах Тревитика ему помогал его родственник, Вивиен (Andrew Vivian).

(одновременно с первыми попытками осуществления парового железнодорожного транспорта) и в 30-х годах, когда постройка первой крупной железной дороги (Ливерпуль — Манчестер) показала дороговизну и трудность осуществления железных дорог и появилась надежда на успешную конкуренцию с ними паровых автомобилей на обыкновенных дорогах. [1] Из изобретателей 20-х годов можно назвать Гордона (D. Gordon), Гурнея (G. Gurney),[2] Брунтона, Джемса и др. Несмотря на успехи настоящих паровых автомобилей с ведущими колесами, приводимыми в движение от паровой машины, у некоторых из этих изобретателей оставались сомнения насчет непосредственного приведения в движение колес (им казалось, что колеса будут скользить по земле, а не двигать экипаж), и они взамен колес предлагали устраивать механизмы с ногами, подражающими движению ног лошадей. Эти неудачные изобретения являются хорошим примером



Фиг. 82

неправильности той идеи, что механические изобретения должны вообще «подражать природе»; отголоски этой идеи встречаются и позже. Эти изобретения, конечно, никакого успеха не имели.

Большее значение получила конструкция английского инженера Ганкока (W. Hancock) в 30-х и 40-х годах XIX столетия. Ганкок построил несколько автомобилей («Инфант», «Аутопси», «Эра», «Эрик»), которые совершали регулярные рейсы между различными английскими городами со скоростью 15—18 и даже до 24 км в час. В техническом отношении автомобиль Ганкока тоже является хорошо продуманным; разрез и вид его представлен на фиг. 82.

Автомобиль этот имеет вертикальную машину с цепной передачей; котел — с вертикальными водяными камерами, омываемыми горячими газами. Автомобили Ганкока, к которым скоро присоединились и автомобили других изобретателей (Огль — Ogle, Суммерс — Summers, Мачеранс — Macherons) насчитывались уже десятками, но дальнейшему

[1] Рюльман. Цит. соч., т. III, стр. 134.

[2] Гурней сделал интересную первую попытку постройки машины, работающей парами аммиака (Терстон. Цит. соч., ч. I, стр. 175).

распространению их воспрепятствовала сильнейшая оппозиция, встреченная со стороны их конкурентов: содержателей обыкновенного экипажного транспорта и развивающихся железнодорожных компаний; дело дошло до парламента и были изданы правила движения паровых автомобилей, чрезвычайно стеснявшие его. Эти неблагоприятные экономические условия не позволили паровому транспорту на обыкновенных дорогах развиться и вскоре он вообще почти уничтожился. Однако попытки создания паровых экипажей продолжались и дальше.

На Лондонской выставке 1862 г. было представлено 14 таких машин. [1] Стали получать особенное развитие тяжелые, медленно ходящие, «дорожные локомотивы», применяемые для перемещения больших тяжестей (вроде теперешних тракторов); такие локомотивы системы Бойделля (Boydell) нашли приложение в Крымской кампании (1854—1855 гг.) для перемещения грузов от Балаклавы к английским позициям возле Севастополя. [2]

Попытки введения паровых автомобилей делались в эту эпоху во Франции, Бельгии и Германии, но тоже без особенного успеха.

Первые локомотивы для передвижения по рельсам

Преимущества рельсового пути перед обыкновенной дорогой были давно известны: имеются сведения, что рельсы применяли в горном деле в Германии уже в средние века. Рельсы делались первоначально деревянные; с развитием металлургии их стали делать из чугуна, а затем — железные. Для передвижения по рельсам тележек (с углем или рудой) служила сила животных или даже людская сила.

Первой серьезной попыткой применения паровой тяги на железных дорогах было создание паровоза Тревитиком в 1803—1804 гг.[3] Он изображен на фиг. 83.

Котел у него был с жаровой трубой и обратной тягой. Цилиндр был помещен горизонтально над жаровой трубой. От крейцкопфа сделана шатунно-кривошипная передача к зубчатым колесам, связанным с ведущими колесами.

Локомотив этот предназначался для перевозок на железных копях Пенидаррон в Южном Валлисе. Он перевозил 17,3 т груза со скоростью, колебавшейся между 6,4 и 25,7 км/час, преодолевая кривые малого радиуса и подъемы в $^1/_{50}$, которые были на его пути (общая длина пути была равна 15,6 км).

---

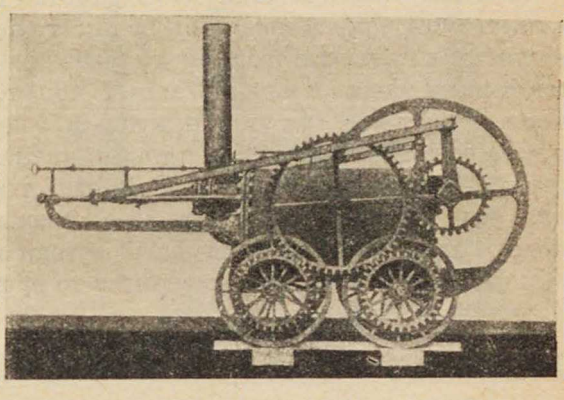
[1] Рюльман. Цит. соч., т. VI, стр. 139. Там сообщается, между прочим, о выставленных «паровых санях» или «ледяном локомотиве», предназначенном для передвижения по Неве. В русских источниках мы не нашли указаний на такую машину.

[2] Рюльман. Цит. соч., стр. 138. Эти тяжелые паровые дорожные локомотивы послужили также прототипом для созданных вскоре паровых плугов.

[3] Новейшие сведения о жизни и изобретениях Треветика имеются в книге Dirkinson and Titley. Richard Trevithik. Cambridge, 1934 г. Книга эта издана к 100-летней годовщине со дня смерти Треветика.

В ближайшие годы Тревитик построил еще несколько паровозов такого же типа как показанный на фиг. 83, а в 1808 г. предложил новый тип паровоза с вертикальным цилиндром. Как в первой, так и во второй конструкции часть пара применялась для подогрева питательной воды, другая часть выпускалась в дымовую трубу через суженное отверстие для создания тяги в топке (идея аппарата, позже названного конусом паровоза).

Но все успехи паровозов Тревитика не могли победить недоверия к ним со стороны широких деловых кругов, [1] и Тревитик принужден был продать как машины для употребления в качестве стационарных, после чего он оставил свою работу над паровозом и занялся другими изобретениями.



Фиг. 83

Однако, потребность в применении паровой тяги к железнодорожному транспорту была так велика, что вопросом этим занялись многие изобретатели в Англии и Америке.

Несмотря на доказанную полную возможность самостоятельного передвижения локомотива по рельсам на дорогах с обыкновенными подъемами (благодаря сцеплению колес с рельсами), первые дальнейшие изобретатели предлагали более сложные способы передвижения по рельсам. Бленкинсоп (Blenkynsop) предлагал применять рельсы с зубчаткой и снабдить паровоз зубчатым же колесом (1811 г.). Эта идея нашла позже применение в горных дорогах с большим подъемом, а Чапман (1812 г.) (Chapman) предлагал прокладывать цепь вдоль пути и навивать ее при помощи паровозной машины на особый шкив, укрепленный на паровозе и тем приводить его в движение. Эти предложения не имели, однако, никакого успеха и изобретатели вновь вернулись к идее непосредственного передвижения локомотива по рельсам вследствие сцепления возникающего между ними и ведущим колесом.

В Америке горячим защитником этой идеи явился Джон Стевенс (известный своими работами по усовершенствованию парохода, о которых мы говорили выше).

---

[1] Однако, значение изобретения Тревитика было понятно специалистам, и владельцы бывшей фабрики Уатта и Болтона (в то время уже ушедших от дел) для ограждения себя от конкуренции возбудили вопрос о запрещении применения машин высокого давления Тревитика, как представляющих опасность для близко находящихся к ним лиц. Впрочем, это предложение не нашло поддержки.

Но он не дал конкретного проекта паровоза. В Англии же к идее обыкновенного паровоза вернулся Блекет Гедли (Blacket Hedley), построивший в 1813 г. свой паровоз, сохраняемый в настоящее время в Соут-Кенсингтонском музее. Однако окончательное осуществление паровоза и широкое введение его в жизнь связано не с именем Гедли, а с именем Георга Стефенсона. [1] К изложению его работ в этой области мы и переходим.

Создание паровоза Георгом Стефенсоном

Георг Стефенсон родился в 1781 г. Отец его был бедным рабочим в угольных копях.[2] Уже в ранней молодости Георг Стефенсон обнаружил большой интерес к механическим работам и к учению вообще. Но обстоятельства его ранней жизни были так тяжелы, что только в 15 лет он научился писать. С этого времени он начинает деятельно изучать работу атмосферных машин и машин Уатта. В 1801 г. он поступает на службу в качестве машиниста при угольных копях, годом позже он женился и в 1803 г. у него родился сын Роберт, который явился деятельным сотрудником при осуществлении изобретений своего отца и который сам очень много сделал для усовершенствования паровоза. Около этого же времени Стефенсон подружился с знаменитым впоследствии инженером Вильямом Ферберном (William Fairbairn), который в то время был также простым рабочим в соседних угольных копях.

В 1812 г. Г. Стефенсон был назначен главным машинистом в копях в Киллингворте, и это место с более высоким содержанием позволило ему улучшить свою жизнь, что дало ему возможность пополнить свои знания по машинам. Около 1812 г. Стефенсон познакомился с паровозами Гедли и Бленкинсопа и с этого времени начинаются его работы по созданию собственного типа паровоза. Он сразу понял ненужность применения зубчатой

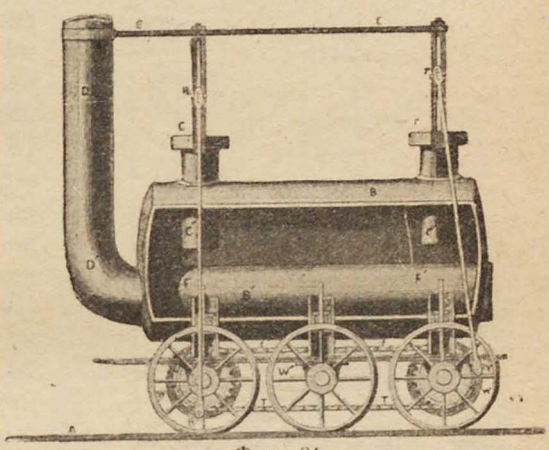
---

[1] В конце 50 годов сын Гедли издал сочинение, в котором отстаивал приоритет своего отца в деле создания паровоза. Эта брошюра вызвала ответ сына Георга Стефенсона, Роберта, защищавшего значение своего отца в деле изобретения паровоза. Для нас этот спор не имеет значения, так как из приведенных выше данных видно, что создание паровоза есть дело целого ряда изобретателей. Если же желать во что бы то ни стало установить приоритет в этом вопросе, то надо было бы, конечно, остановиться на Тревитике, а не на Гедли.

[2] Основным материалом для биографии Стефенсона являются сочинения Смайльса; Smiles. The Life of George Stefenson, Лондон, 1857 и Smiles. Lives of the Engineers, Vol. III, (George and Robert Stefenson). Краткие сведения о жизни Стефенсона и об истории изобретения паровоза имеются во всех историях паровой машины и в специальных сочинениях по паровозам, например, знаменитом в свое время сочинении Кларка; Clark. Railway Machinery, Лондон, 1855. Очень содержательный очерк истории паровоза, составленный Гейзангером, имеется в книге «Handbuch für spezielle Eisenbahntechnik» Bd. 2, Leipzig, 1875 г. Данные о ранних типах паровозных машин имеются также в книге Тредгольда (добавление, сделанное Маллетом). На русском языке имеется книга Шотлендера «История паровоза». Сведения по истории паровоза помещены также в курсе проф. А. Д. Романова «Паровозы», изд. 2, 1906.

Хорошо составленный новейший очерк создания и развития паровоза принадлежит проф. А. Н. О'Рурку: «Путь локомотива». Страницы из истории техники. Ленинград, 1934 г.

полосы, связанной с колесами паровоза и создал в 1814—1815 гг. типы паровозов для движения по обыкновенным рельсам. В его паровозе, представленном на фиг. 84, котел — с жаровой трубой, цилиндры вертикальные, передача к колесам сделана помощью шатуна и кривошипа и колеса соединены между собой цепью. В ближайшие годы Стефенсону удалось построить еще несколько паровозов своей системы для перевозки угля из угольных копей. Слабой стороной этих паровозов Стефенсона являлся паровой котел с одной жаровой трубой, который не мог давать достаточно пара. В 1823 г. Стефенсон взял на себя постройку железной дороги Стоктон—Дарлингтон, которая сыграла большую роль в истории железнодорожного дела. При постройке этой дороги (по которой должен был перевозиться уголь из графства Даргам к северным портам Англии) первоначально не предполагали вводить на ней паровую тягу, но Стефенсону удалось убедить ввести на ней этот способ тяги и ему были заказаны для этой дороги несколько паровозов. Для производства их Стефенсон устроил (при содействии некоторых капиталистов) в Ньюкестле первый паровозный завод, на котором были изготовлены первые 5 паровозов для указанной железной дороги. Ведение этого завода было передано сыну Георга Стефенсона, Роберту.



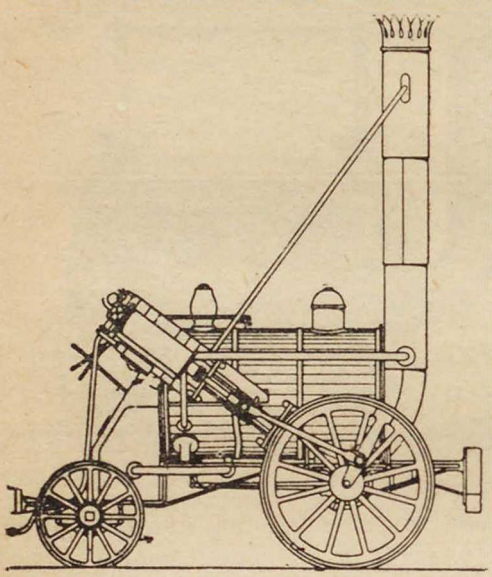
Фиг. 84

Паровозы эти оказались не очень удачными, но в 1827 г. для той же дороги были выработаны новые типы паровозов Гаквортом (Timothy Hackworth), которые оказались более удачными и позволили сохранить на дороге паровую тягу. Впрочем, первоначально паровая тяга применялась только для перевозки грузов, а пассажиры перевозились лошадьми, так что эта дорога являлась также прототипом позднейших конно-железных дорог. После введения паровозов Гакворта и пассажирское движение переведено было на паровую тягу.

Все вышеизложенные попытки применения паровой тяги на желе ных дорогах подготовили почву для постановки более крупных задач в об ласти железнодорожного дела. Первой такой задачей была постройка железной дороги Ливерпуль — Манчестер. Постройка этой дороги явилась окончательным шагом для торжества паровой тяги на железных дорогах. Постройка рельсовой дороги приближалась к концу в 1829 г., [1] но род тяги,

[1] Строительство пути представило свои затруднения, особенно прохождение большого торфяного болота, но затруднения эти были благополучно преодолены благодаря указаниям самого Г. Стефенсона и другого известного инженера, Ренни, стоявших во главе постройки.

который должен был на ней применяться, вызывал большие споры и руководители предприятия колебались в своем выборе: среди них были защитники конной тяги, канатного передвижения поездов при помощи паровых машин, поставленных на постоянных станциях и, наконец, локомотивов. Последний способ вызывал у многих большие опасения, в особенности в приложении к пассажирскому движению; комиссии из разных авторитетных лиц, которым управление дороги поручало разбор вопроса о выборе рода тяги для дороги Ливерпуль — Манчестер, высказывались довольно уклончиво. Наконец, дирекция дороги объявила конкурс на поставку локомотивов, причем главными условиями конкурса были: вес паровоза не более 6,1 т, вес перевозимого поезда — 20,2 т со скоростью в 16 км, стоимость — не выше 550 фунтов стерлингов, давление пара — не выше 3,5 атм. Испытание должно было происходить на ровном участке возле станции Ренгиль (Rainhill), длиной в 3,22 км; этот участок должен был быть пройден 20 раз. К окончанию срока конкурса (начало октября 1829 г.) было представлено 4 паровоза: «Новельти» Эриксона, [1] «Сан-парейль» — Гакворта (о деятельности которого в области паровозостроения мы говорили выше), «Персеверанс» Бурсталля и «Ракета» («Rocket») Стефенсона.



Фиг. 85.

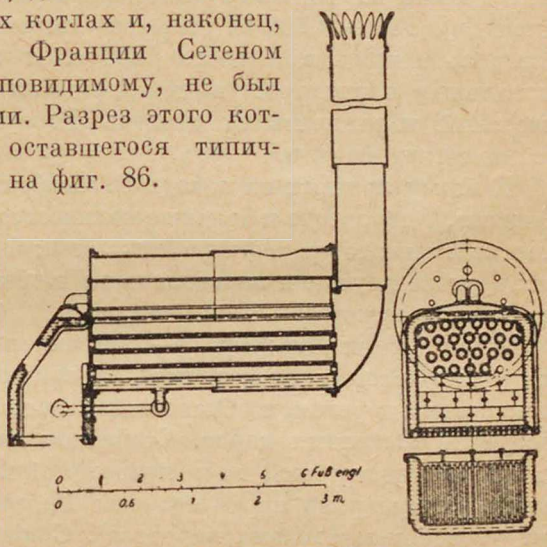
Из этих паровозов «Персеверанс» не удовлетворял условиям конкурса и не был допущен к нему, паровоз Гакворта превышал по тяжести норму, данную в условиях конкурса; во время конкурсного испытания он скоро потерпел серьезные аварии в питательном насосе и в котле и должен был выйти до окончания конкурса. Наибольшее внимание привлекал к себе паровоз Эриксона «Новельти» своей легкой и изящной конструкцией (он весил почти вдвое меньше остальных паровозов), [2] но он тоже потерпел во время испытания несколько аварий (лопнула труба для провода

[1] Эриксон (по происхождению швед) являлся тоже одним из талантливейших изобретателей своего времени; ему принадлежит введение гребного винта в судостроении, создание особого типа машины для работы нагретым воздухом, создание особого типа бронированного военного судна («Монитор»), сыгравшего большую роль в гражданской войне в США.

[2] Он представлял и другие интересные технические особенности: котел, состоящий из цилиндрической окруженной водой топки, и цилиндрической части, через которую пропущена была несколько раз изогнутая труба для пропуска дымовых газов, передача движения от поршня к ведущим колесам и др.

горячих газов через цилиндрическую часть котла) и тоже вышел из конкурса. Таким образом из всех представленных паровозов осталась только одна «Ракета» Стефенсона, которая блестяще выдержала все испытания. «Ракета» изображена на фиг. 85. [1]

Главную особенность ее составляет удачно сконструированный паровой котел (аварии с другими паровозами произошли именно в паровых котлах). Стефенсон применил в этом паровозе трубчатый котел (25 дымогарных труб диам. в 3 дм.). Котлы с дымогарными трубами предлагались правда, и раньше Треветиком, далее — в некоторых американских пароходных котлах и, наконец, были даже патентованы во Франции Сегеном (M. Séguin), [2] но Стефенсон, повидимому, не был знаком с этими предложениями. Разрез этого котла, до настоящего времени оставшегося типичным для паровоза, изображен на фиг. 86.



Фиг. 86

Пар из цилиндров выходил через конус для создания тяги. Цилиндр помещен наклонно и от него сделана шатунно-кривошипная передача к переднему колесу. Парораспределение делалось золотником, управляемым попеременно 2 эксцентриками (переднего и заднего хода), сидящими на ведущей оси и вводимыми в действие согласно направлению движения паровоза при помощи закрепления на оси от руки. При весе поезда, равном 17,3 т, «Ракета» достигла средней скорости, равной 21,56 км; наибольшая достигнутая скорость равнялась 34,444 км/час, а после небольших исправлений (во время приемочных испытаний) достигнута была скорость даже в 45 км/час. Очень благоприятным обстоятельством для «Ракеты» являлось также полное отсутствие аварий во время испытаний.

Для уяснения малости размеров «Ракеты» по сравнению с позднейшими паровозами достаточно сказать, что мощность ее машины равнялась 12 л. с. и потребление кокса (примененного при опытах) достигало 8,2 —

[1] Первоначальный тип «Ракеты» был быстро изменен в первый год эксплоатации. Поэтому сведения о нем противоречивы. Тип, сохраняемый в Соут-Кенсингтонском музее, является уже измененным против первоначальной конструкции.

[2] Патент Сегена 22 февраля 1828 г. Биографические сведения о Сегене (являющимся также одним из первых, высказавших мысль о связи между теплотой и механической энергией) имеются в издании, посвященном истории успехов прикладной механики за XIX столетие по случаю выставки 1900 г. в Париже (Mécanique à l'Exposition de 1900, 12-me livraison, Paris, 1902).

9,1 кг/л.с.ч. По сравнению с прежними паровозами это все же представляло шаг вперед, т. к. их мощность была около 10 л. с., а расход угля — 13,6—18,1 кг/л.с.ч.

«Ракета» вышла из конкурса полной победительницей; приз был разделен между Г. Стефенсоном и Бутом, который принимал участие в выработке типа котла с дымогарными трубами.

Сейчас же после окончания опытов в «Ракете» сделаны были некоторые усовершенствования, доведшие мощность ее до 20 л. с. Расход кокса на тонно-километр равнялся 0,452 кг, но вскоре понизился до 0,186 — 0,218 кг на т/км. Открытие дороги Ливерпуль — Манчестер состоялось в сентябре 1830 г. и превратилось в крупное национальное торжество: в нем приняли участие герцог Веллингтон, известный парламентский деятель Роберт Пиль и др.; вдоль дороги стояли толпы народа.

К этому времени на заводе Р. Стефенсона было изготовлено, кроме «Ракеты», 7 паровозов и большое количество вагонов, которые все приняли участие в этом торжественном открытии: был составлен ряд поездов, идущих друг за другом и перевозивших в общей сложности до 600 пассажиров со скоростью 35—40 км/час.

Опыт дороги Ливерпуль — Манчестер блестяще опроверг все опасения (часто совершенно нелепые), связанные с введением паровозной тяги на железных дорогах, и в Англии началось сильнейшее движение в пользу постройки железных дорог. Стефенсон занялся составлением проектов этих дорог, постройкой их и постройкой паровозов, причем во всех этих делах крупную роль играл его сын Роберт (особенно много сделавший для усовершенствования паровоза). С развитием постройки железных дорог в других странах, Стефенсону пришлось делать отдаленные поездки, например, в Бельгию в 1845 г. и вскоре после этого — в Испанию. Имя Стефенсона сделалось европейски знаменитым. Он умер в 1845 г., окруженный такими же почестями, как Уатт в конце своей жизни.

Г. Стефенсон представляет вообще большое сходство с Уаттом: тщательная конструктивная проработка своих изобретений, удачный выбор самих объектов для изобретения, отвечающих настоятельным потребностям эпохи, чрезвычайная настойчивость в деле осуществления своих изобретений. Эти качества обеспечили ему такой же успех, как и Уатту. Тип этих изобретателей резко отличен, например, от Тревитика, который отличался чрезвычайным богатством новых идей, но не дорабатывал их до конца и, главное, не проводил с настойчивостью одной идеи, а, при затруднениях, оставлял ее в стороне и переходил к занятию другим изобретением.

Роберт Стефенсон продолжал деятельность своего отца по паровозостроению и постройке железных дорог. Он построил, между прочим, замечательные сооружения — трубчатый мост через канал Меней, мост «Виктория» через реку св. Лаврентия в Канаде. Он умер в 1859 г.

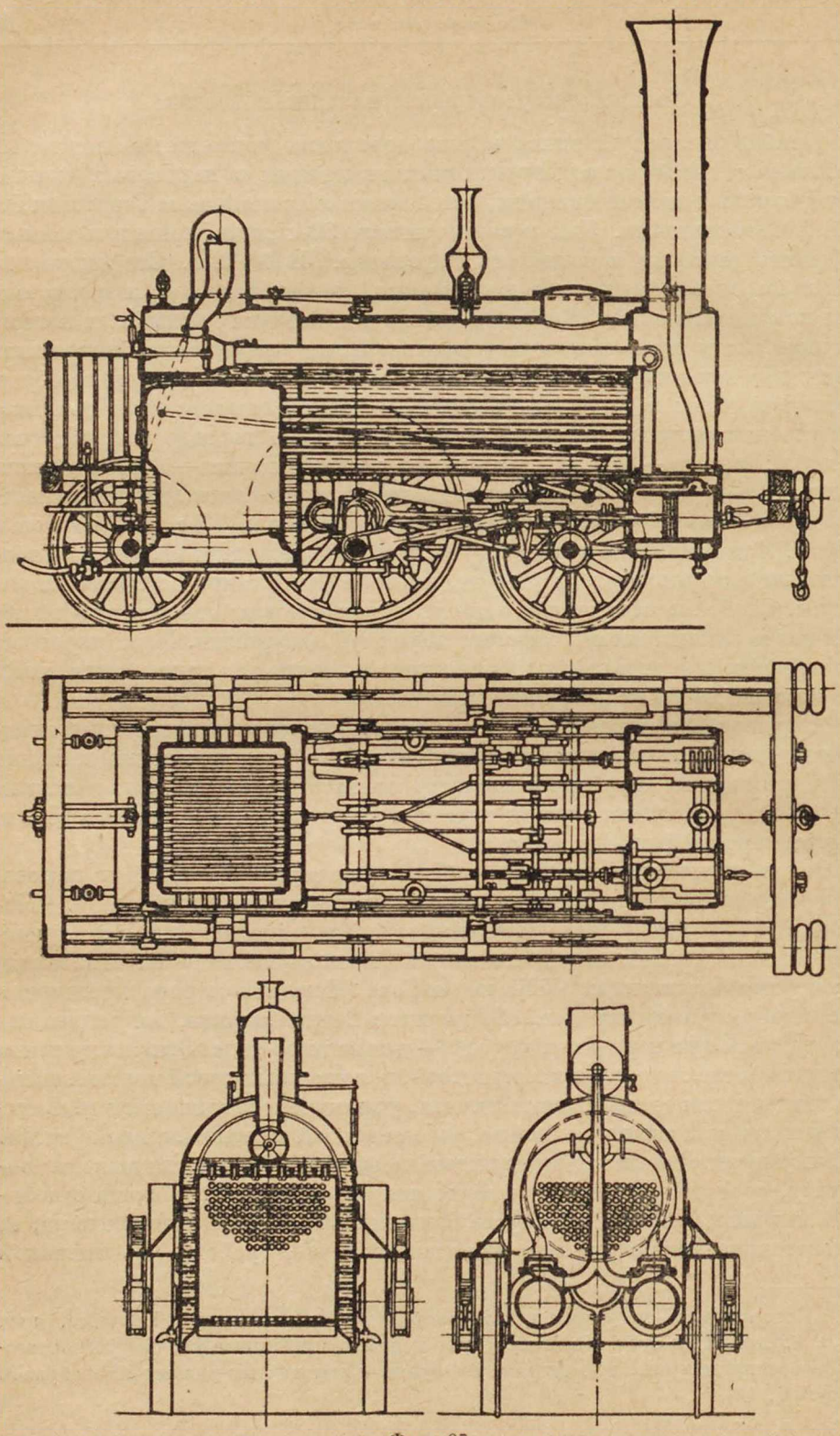
Дальнейшее усовершенствование паровоза

Крайне быстрое развитие железнодорожного движения в Англии потребовало дальнейших конструктивных изменений в паровозах, причем ведущая роль в этом отношении долгое время сохранялась за Георгом и Робертом Стефенсонами. Уже в самом начале 30-х годов пришлось сильно увеличить размеры и мощность паровозов. В 1830 г. Стефенсон построил паровоз «Планету» с цилиндрами, лежащими внутри рамы; они были помещены в дымовой коробке для предохранения от тепловых потерь. Ведущие оси у этого паровоза делались, в виду внутреннего положения цилиндров, коленчатыми. Этот тип паровоза долгое время считался образцовым в Англии и даже в настоящее время многие паровозы делаются с внутренними цилиндрами. Размеры «Планеты» гораздо больше, чем «Ракеты»: вес ее — 9,5 т, поверхность нагрева топки — 3,46 м², число дымогарных труб — 120, диам. по 41,2 мм, которые дают еще поверхность нагрева в 34,37 м². «Планета» могла везти поезд в 76 т со скоростью в 25 км. Приняты были меры для увеличения надежности работы паровоза и уменьшения расходов на ремонт, которые были в первое время колоссальны. Особенно частые порчи происходили в котле; отчасти их удалось уменьшить заменой медных дымогарных труб латунными. Рамы паровоза, буксы, подшипники и самая машина представляли ряд недостатков, которые постепенно были устраняемы.

Паровозы Стефенсона 1836 г. и 1843 г. сильно приближаются к позднейшему типу паровозов: цилиндры делаются горизонтальными, топка прикрепляется к наружному кожуху анкерными болтами, над котлом помещается колпак для осушки пара и т. д. Изображение паровоза 1836 г. представлено на фиг. 87 а, б, в, г.

Очень неудовлетворительно работало парораспределение в паровозах и было сделано чрезвычайно много попыток для его улучшения. [1] Наконец, в 1843 г. предложено было парораспределение, носящее имя «кулиссы Стефенсона», хотя оно было только сконструировано на его заводе инженерами Вилиамсом (Williams) и Гове (Howe). В парораспределении этом, изображенном на фиг. 88, имеются 2 эксцентрика, закрепленных на валу, один для переднего, другой — для заднего хода. Эти эксцентрики посредством тяг соединяются с кулиссой, положение которой может меняться в зависимости от положения рычага, управляемого машинистом. Внутри кулиссы находится «камень», соединенный с золотниковой тягой. В зависимости от положения кулиссы камень этот передает движение золотнику, соответствующее переднему или заднему ходу. В связи с положением кулиссы находится также больший или меньший впуск пара, а, следовательно, большая или меньшая величина работы, развиваемой

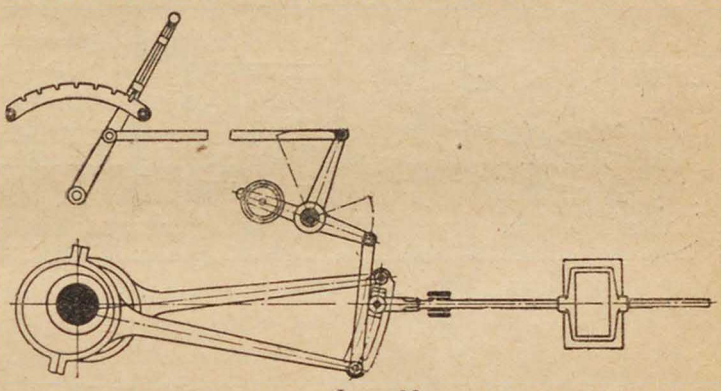
[1] История этих постепенных изменений подробно изложена у Матчосса, цит. соч., т. 1, стр. 811 и след. До изобретения кулисс существенное улучшение паровозных парораспределений было сделано во Франции знаменитым ученым Клапейроном (Clapeyron).



Фиг. 87

машиной. Таким образом, кулисса является органом, не только изменяющим направление вращения машины, но также и регулирующим органом.

Кулисса Стефенсона получила чрезвычайное распространение в паровозах и в других реверсивных машинах и даже до настоящего времени сохранила большое значение. Почти одновременно с кулиссой Стефенсона (в том же 1843 г.) была предложена кулисса Гуча (Gooch), отличающаяся тем, что у нее изменение направления вращения достигается перемещением тяги, идущей к золотниковому штоку, а сама кулисса подвешена на тяге, вращающейся вокруг постоянной точки вращения. Несколько позже(в 1855 г.) была предложена 3-я кулисса этой же группы («кулиссы с 2 эксцентриками» Аллана) (Allan), в которой и кулисса и тяга получают движение от рычага друг другу навстречу. Кулисса Аллана отличается своей прямолинейной формой, представлявшей некоторое удобство для обработки. Но особенного распространения ни кулиссы Гуча, ни кулиссы Аллана не получили.



Фиг. 88

Большое значение приобрели впоследствии кулиссы другой группы, предложенные около того же времени, именно кулисса, предложенная бельгийским механиком Вальсгаертом (Walshaert) в 1844 и 1848 гг. Независимо от Вальсгаерта, хотя и позже его, эта же кулисса в несколько измененном виде была предложена в Германии Гейзингером фон Вальдег, [1] поэтому в Германии и России она известна более под именем кулиссы Гейзингера. Она является в настоящее время самой распространенной паровозной кулиссой. Механизм этот в более современном исполнении изображен на фиг. 89.

В этом парораспределении кулисса сама получает начальное движение от тяги, идущей от эксцентрика или 2-го кривошипа (находящегося под углом в 90° к основному кривошипу машины). Кулисса сообщает движение одному концу тяги, соединенной со штоком золотника. Движение другому концу этой тяги сообщается от крейцкопфа.

Кроме указанных кулиссных парораспределений предлагалось для паровозов огромное количество других, не удержавшихся в практике. [2]

---

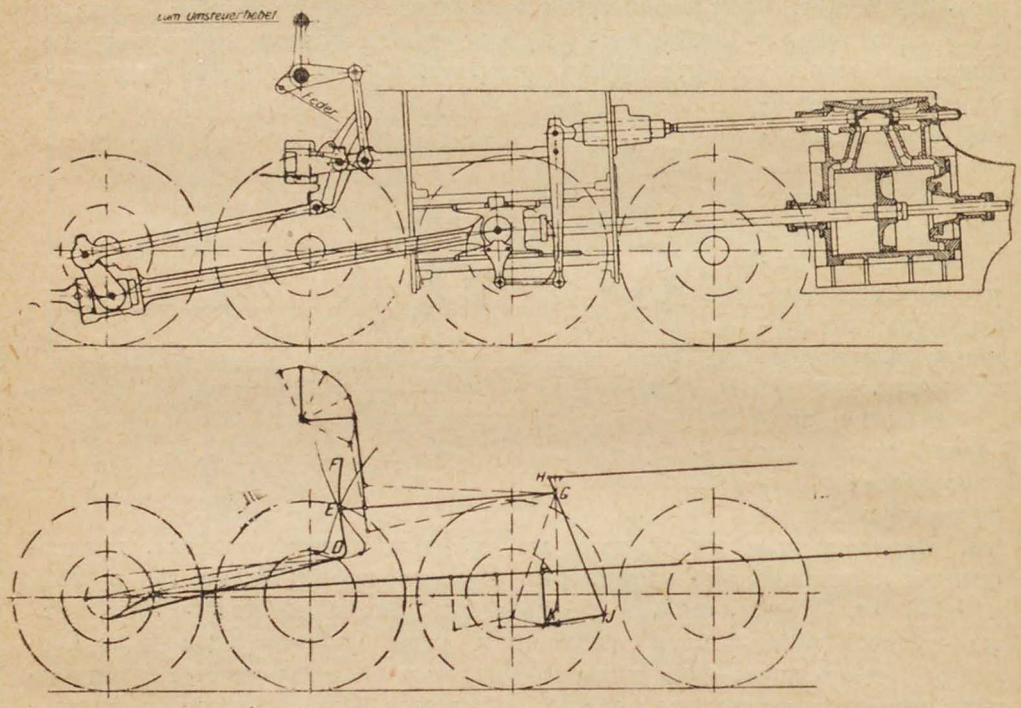
[1] Приоритет Вальсгаерта установлен многими работами, например, в статье B o u l v i n, Histore de la distribution Walstaerts. Rev. de Mécanique, 1901, I-полов., стр. 105. Там помещены и биографические сведения о Вальсгаерте.

[2] О кулиссах, применяемых в пароходных машинах, мы будем говорить позже.

В паровозах был внесен также ряд конструктивных улучшений, на которых мы не можем останавливаться.

Постройка железных дорог чрезвычайно быстро развивалась в Англии и других странах, несмотря на оппозицию некоторых заинтересованных в сохранении прежних способов сообщения групп и на отрицательные отзывы о железных дорогах, иногда принадлежащие очень авторитетным лицам (например, Тьеру — во Франции, Канкрину — в России).

В 30-х годах железные дороги стали строиться во Франции, Бельгии, Германии, Австрии и других европейских странах. Паровозы для этих



Фиг. 89

дорог выписывались частью из Англии (где в это время возникло уже несколько паровозостроительных заводов, кроме Стефенсоновского), частью стали строиться на собственных заводах, например, во Франции — Кабе, Кайль, Фив — Лилль, Шнейдер и др., в Германии — Маффей в Мюнхене и особенно Борзиг в Берлине (1841 г.). Особенным успехом долгое время пользовались паровозы Борзига, которые заказывались позже и для некоторых русских железных дорог. В Бельгии паровозы строились у Кокериля в Серенге, на заводе Леонард в Льеже и др., в Австрии — на заводе Зигля, заводе австрийских государственных железных дорог и др.

Особенно быстро развивалась постройка железных дорог и паровозов в Соединенных Штатах. Так, уже в 1832 г. там начал строить паровозы Болдвин (Mathew Baldwin), вскоре построивший специальный завод,

сделавшийся одним из самых крупных в свете и существующий и в настоящее время. Затем постройкой паровозов занялся Норрис (William Norris), который поставил много паровозов для Европы. Американские паровозы отличались крайне оригинальными конструктивными особенностями и в скором времени они начали оказывать большое влияние на европейское паровозостроение. Так, например, в американских паровозах были впервые применены поворотные тележки, облегчающие прохождение кривых, получившие затем широкое распространение на европейских дорогах.

Размеры и мощность паровозов быстро возрастали. В то время как паровоз Стефенсона «Ракета» имел вес около 4,5 т, паровозы конца 40-х и 50-х годов достигают веса в 23—25 т (и есть даже американский паровоз весом в 35 т); соответственно увеличились и все размеры и мощность паровозов. С целью еще более увеличить размеры паровозов английский инженер Брюнель предложил строить дороги с более широкой колеей (7 фут., т. е. 2,1 м) и такая дорога была построена (Creat Western) и для нее построен был Гучем большой паровоз «Великобритания» весом в 31 т с котлом, имеющим поверхность нагрева 18,34 м^2 (350 трубок по 50 мм диаметром). Но предложение Брюнеля успеха не имело, также как и его предложение устройства пневматической дороги. Далее типы паровозов делаются так многочисленны, что обзор их делается невозможным и для целей настоящего сочинения бесполезным, так как они не представляли ничего особенного в термодинамическом отношении, хотя общее улучшение конструкции их сильно понизило расход пара: в опытах 50-х годов расход угля, по данным Кларка, понизился до 2,5 кг на лош. силу в час.

Упомянем только о некоторых типах паровозов этой эпохи. Одним из них являлся крайне оригинальный тип паровоза, предложенный Крамптоном в 1846—1848 гг., предназначенный для перевозок скорых поездов: он имел одну ведущую ось, помещенную сзади топки и две поддерживающих оси. Ведущее колесо отличалось огромным диаметром — около 2 м; цилиндр помещался между поддерживающими осями. Паровозы эти получили сначала большое распространение в Англии и Франции, [1] но затем оказались слишком слабыми вследствие наличности одной только ведущей оси и вытеснены быстроходными паровозами с 2 спаренными осями.

В 1850 г. была построена в Австрии первая крупная горная дорога (через Земмеринг); для нее был построен специальный тяжелый паровоз с 4 спаренными осями; такие паровозы стали строиться и для товарных поездов.

Из отдельных усовершенствований, предложенных для паровоза, следует еще упомянуть о золотниках Трика (Trick) с перепуском пара

[1] Автору удалось в середине 90 годов видеть паровоз Крамптона на Варшавской жел. дор., где он сохранялся, но не работал. Его намеревались переделать и пустить в ход, но потом оставили это намерение.

(предложенных в 1855 г.) и нашедших большое распространение в паровозной практике, а затем и в стационарных паровых машинах; об инжекторе Жиффара, предложенном в 1858 г. (о котором мы будем говорить позже), сделавшимся наиболее распространенным аппаратом для питания паровозных котлов (кроме американских, на которых долгое время держались питательные насосы) и о приборе Лешателье, облегчающем применение контрпара для более быстрой остановки паровоза.

Нам остается только сказать еще несколько слов о постройке железных дорог и паровозов в России. [1] Первая железная дорога, построенная в России, была Царскосельская, открытая в 1837 г.; дорога эта обслуживалась иностранными паровозами Гакворта, Стефенсона и Коккериля. Однако, еще раньше в 1833 г. был построен на Нижне-Тагильском заводе механиком Черепановым первый в России паровоз; паровоз этот применялся для перевозки медной руды на указанном заводе. Но настоящее регулярное производство паровозов было поставлено в 1844—1845 г. на Александровском заводе в Петербурге в связи с постройкой железной дороги между Петербургом и Москвой, начавшейся в 1843 г. и законченной в 1851 г. Завод этот был в 1848 г. передан в аренду американским предпринимателям Гаррисону и Уайненсу. На заводе этом до конца 1848 г. построено было 162 паровоза (42 пассажирских и 120 товарных). Части для этих паровозов получались беспошлинно из-за границы, так что, в сущности, на Александровском заводе производилась скорее сборка, чем постройка паровоза. Пассажирские паровозы были 8-колесные с 2 спаренными осями. Вес их был около 20 т, число 2-дюймовых дымогарных трубок 185. Товарные паровозы были с 3 спаренными осями. В 1853 г. открыт был паровозостроительный завод в Петербурге герцогом Лейхтенбергским, но он вскоре прекратил свою деятельность, так как паровозы для русских дорог стали выписываться из-за границы и только в 1866—1868 гг. паровозостроение в России было поставлено на нескольких заводах благодаря восстановлению заказов паровозов русским заводам (Путиловскому, Невскому, Воткинскому, Мальцевскому, Коломенскому). К 1875 г. общее число паровозов, поступивших на службу на железных дорогах было равно 3 652, из них 2 884 были заграничного производства, а 768 — русского [2] (Александровского завода — 246, Коломенского—204, Русск. Общ. Горн. и Механ. заводов (Невский завод) — 179, Мальцева —92, Воткинских —21, герцога Лейхтенбергского —20 и мастерских Варшавской жел. дор.—6).

---

[1] Наиболее полные сведения о постройке паровозов на русских заводах имеются в вышецитированных статьях Н. Ф. Лабзина и Ершова, а также книге А. А. Брандта: «Очерк истории паровой машины» и в составленном С. М. Верховским «Кратком историческом очерке начала и распространения железных дорог в России по 1897 г. включительно», изданном в связи с исполнившимся в 1898 г. столетним юбилеем Ведомства путей сообщения. Сведения о паровозостроении в России помещены также в вышецитированной книге проф. О'Рурка.

[2] А. А. Брандт. Цит. соч., стр. 65.

Глава IV

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПАРОВОЙ МАШИНЫ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX СТОЛЕТИЯ

Значение физического представления о теплоте в создании паровой машины

Представление о природе тепла было чрезвычайно различно в различные эпохи. В вопросе этом боролись 2 течения: одно, принимавшее теплоту за некоторое вещество, позже более точно принимаемое за некоторую невесомую материю, и другое — представлявшее теплоту по крайней мере связанной с движением мельчайших частиц тела. Утверждение о кинетической природе тепла, хотя и в очень неясной форме являлось преобладающим в XVII столетии и принимает более точную формулировку у крупных ученых и философов этой эпохи. Одним из первых сформулировал это мнение лорд Бэкон. [1] Рассматривая различные способы получения тепла и указав, что оно может получаться посредством механических действий, он приходит к заключению, что теплота есть движение. Взгляд его разделялся большинством английских и континентальных ученых того времени. Особенно ясно мнение о двигательной природе тепла сформулировано Гюйгенсом. В своем сочинении о свете [2] он говорит так: «нельзя сомневаться, что свет состоит в движении некоторой материи. Потому, что, если рассматривать причины, производящие свет, то окажется, что на земле его производят преимущественно огонь и пламя, которые несомненно содержат тела, находящиеся в быстром движении, так как они растворяют и расплавляют другие самые твердые тела. Если же рассматривать его (света) действие, то видно, что когда свет уловлен, например, посредством вогнутых зеркал, то он имеет свойство жечь, как огонь, т. е. он разъединяет части тел, что показывает несомненно на движение, по крайней мере согласно истинной философии, в которой причиной всех естественных явлений считают движение. Это положение и должно быть, по моему, принято, или надо отказаться от надежды что-либо понимать в физике».

---

[1] Взгляды Бэкона на природу теплоты подробно изложены у Розенберга «История физики», ч. 2. Русск. перев., М. — Л. 1933, стр. 101 и след.

[2] Huyghens. Traité de la lumière. Leyde. 1690, стр. 2.

Большинство представителей мнения о динамической природе тепла в Англии (к числу которых принадлежал и Ньютон) принимали теплоту за колебание именно мельчайших частиц самих тел. Большинство же континентальных представителей этого взгляда считали, что колебательное движение имеют не частицы самого тела, а скорее частицы особой тонкой и упругой материи, проникающей во все поры тел и заполняющей пространство между их частицами. [1] В этой второй форме представление о динамической природе тепла приближается к материальной теории тепла.

В XVIII в. постепенно начинает получать преобладание чисто материальное представление о природе тепла, хорошо и просто объясняющее законы калориметрии, которые усиленно разрабатывались в эту эпоху (русскими академиками Крафтом, Рихманом и Блеком в Англии). Но и в эту эпоху можно найти много ученых, придерживавшихся учения о динамической природе тепловых явлений и приближавшихся по воззрениям к современной термодинамике. [2]

Оценивая значение этого динамического представления о природе тепла в самый ранний период изобретения паровой машины, надо сказать, что оно оказывало некоторое положительное влияние на первых изобретателей, так как содействовало пониманию связи между действием огня и механической работой паровой машины. Идея о такой связи высказывается в сочинениях многих изобретателей первых паровых машин (де-Ко, Папина). В очень ярких выражениях эта мысль выражена у Шлаттера в описании действия паровой машин : «что до водяных паров касается, то должно знать, что огонь или субтильная материя сквозь поры, или сквозь невидимые скважины дна котла проходят и водяные частицы в жесткое обращение приводят. Такая материя токмо раздаваться усиливается, чтоб с большей вольностью происходить и для того оная поверх воды подымается и влечет за собою во множестве субтильнейшие водяные частицы, которые потом по всем сторонам давление делают и такою проницающею силою напрягаются, которая, наконец, больше становится, нежели сила тяжести самого воздуха. Когда потом регулятор растворяется, то выходит пар великою силою в большом цилиндре и эмвол [3] так долго вверх отводится, пока вливаемая в цилиндр студеная вода пар загустить может и силу его уничтожить, так что он, как вода на дно цилиндра опустившись, большой цилиндр пуст оставляет. Таким образом тяжестью атмосферы эмвол пока вниз пригнетается».

Конечно, конкретных данных для расчета машины эта теория тепла дать не могла, но весь расчет атмосферной паровой машины сводился, как было показано, к определению разности между давлением атмосферы и противодавлением в цилиндре, сложенным с сопротивлениями. Так как последние не поддаются учету, то величина этой разности могла быть

[1] Preston. The Theory of Heat. London, 1904, стр. 33.

[2] Из этих ученых в первую очередь надо назвать М. В. Ломоносова, который является во многих отношениях предшественником основателей термодинамики, работавших в XIX в. Эта роль М. В. Ломоносова выяснена в работах Б. Н. Меншуткина.

[3] Эмвол — поршень.

указана только по опытным данным, на что совершенно правильно указывал Ползунов. [1] Таким образом, даже знание свойств водяного пара не представляло особенной важности для конструкторов первых паровых машин. Этого знания, конечно, и не было, так как долгое время не было даже строгого различения между паром и воздухом и многие писатели считали, что вода под действием тепла просто переходит в воздух; при этом, очевидно, не возникает и вопроса о специальных свойствах пара. Однако, хотя химический состав воздуха и различие между газами, в него входящими, были обнаружены только Пристлеем и Лавуазье в конце XVIII в., различие между водяным паром и воздухом было обнаружено еще Ван Гельмонтом (1577—1644). Он характеризовал отличие газа от пара тем, что пар может быть обращен в жидкость, а газ не может. Эта способность водяного пара конденсироваться и нашла широкое приложение во всех машинах низкого давления XVII и XVIII вв. Но машины Уатта (особенно с применением в них расширения) требовали уже гораздо более точного знания свойств водяного пара , чем то, которое было до сих пор. [2] Поэтому необходимо было произвести более точные опыты над свойствами паров. Эти опыты, действительно, начинаются во второй половине XVIII в. и продолжаются, можно сказать, до настоящего времени, обнимая несколько периодов. В следующем отделе мы остановимся на первом периоде этого опытного исследования, идущем до начала опытов Реньо (1843 г.).

Опытное исследование свойств водяного пара в XVIII и первой половине XIX вв.

Опытное исследование водяного пара должно было выяснить прежде всего следующие его свойства:

а) связь между давлением и температурой;

б) связь между давлением и удельным объемом;

в) количества тепла, нужные для нагревания жидкости («теплота жидкости») и обращения ее в пар («скрытая теплота испарения»);

г) закон изменения давления пара при увеличении объема.

Вопрос о связи между давлением и температурой пара являлся одним из самых важных и наиболее исследованных. Уже котел Папина явился наглядным доказательством повышения температуры пара в связи с повышением его давления. Но в котле Папина это явление освещается только с качественной стороны; для выяснения же количественных соотношений нужны были специальные опыты.

Одни из первых таких опытов были сделаны Циглером (Ziegler, 1759 г.) при помощи котла Папина.[3] Но опыты его не отличались

[1] О чем мы уже упоминали.

[2] Мы видели, например, что Дезагюлье считал объем пара при давлении одной атмосферы в 14 000 раз больше, чем объем воды, тогда как истинное значение этого отношения объемов около 1700.

[3] Опыты Циглера описаны в редкой книге: Z i e g l e r. Specimen physico-chemicum de degistore Papini, Basel, 1759. Описание аппарата Циглера помещено у Prony «Nouvelle architecture hydraulique», 2-me ed., Paris, 1796, 2-me partie, § 1358, примечание.

точностью и не получили особенного значения. Большей известностью пользуются опыты самого Уатта.[1] Результаты опытов Уатта явились основой для вывода формулы Тредгольда, выражающей зависимость между давлением и температурой пара. [2]

Раньше, чем результаты опытов Уатта, был напечатан отчет об опытах Бетанкура [3] (1792 г.). Они были обработаны Прони [4] и послужили основанием для формул Прони. Из других ранних опытов (тоже не отличающихся большой точностью) следует упомянуть об опытах самого Робисона,[5] Соутерна (Southern), [6] Шмидта [7] (Schmidt) и Юр (Ure). [8] Совокупность перечисленных опытов составляет первый период в деле изучения свойств водяного пара. Как видно из предыдущего, это большое количество исследований вызвано важным значением, которое первые машины приобрели в тогдашней промышленности. Все эти опыты характеризуются не особенно большой точностью; но в совокупности они все же дали довольно полный материал для основных расчетов в теории паровой машины. Почти все они использованы Тредгольдом для проверки составленной им формулы, выражающей зависимость между давлением и температурой пара.[9]

Вторая серия опытов начинается с опытов Дальтона [10]. К этой серии относятся опыты Гей-Люссака, [11] Дюлонга и Араго [12] и американских физиков, [13] произведенные в 30-х годах XIX столетия. Опыты эти характеризуются большей точностью и большим интервалом, в котором они производились: от самых малых давлений (доходивших у Гей-Люссака до 1/561 атм. до давлений в 24 атм. в опытах Дюлонга и Араго). Эти опыты дали, во всяком случае, возможность делать заключения в пределах давлений значительно больших, чем применявшихся в тогдашних паровых машинах. Они послужили также для составления большого числа формул, выражающих связь между давлением и температурой. [14] Формулы эти по своей сложности не находили технического применения; исключение составляет только формула Тредгольда, игравшая известную роль

[1] Результаты опытов Уатта напечатаны были значительно позже, в издании «Encyclopedia Britanica», 1818 г. (слово «Steam»),а также в книге Robison «System of mechanical Philosophie», т. II, стр. 29, изд. 1814 г.

[2] Tredgold. Цит. соч., франц. перевод, стр. 90.

[3] Betancour. Mémoire sur la force expansive de la vapeur, Paris, 1792.

[4] Prony. Цит. соч., ч. II, § 360 и след.

[5] Robison. Mechanical philosophy, т. II, стр. 34.

[6] Robison. Цит. соч., т. II, стр. 170.

[7] Schmidt. Journal de physique de Gren, т. IV, стр. 151.

[8] Philophical Transactions, 1818.

[9] Tredgold. Цит. соч., стр. 92.

[10] Dalton. Memoir of Manchester Society. Vol. XV, стр. 409.

[11] Biot. Traité de physique, т. 1, стр. 287.

[12] Dulong et Arago. Mémoire de l'Académie, т. X, 1930.

[13] Encyclopedia Britannica, vol. 22.

[14] Сводка формул, предложенных до 1833 г., сделана P. N. Egen. Annalen der Physik, т. 27, 1833. В этой статье приведены 29 формул различных авторов, к которым автор присоединяет еще свою крайне сложную и неудобную для вычислений формулу.

в паротехнике вследствие крупного значения книги Тредгольда в рассматриваемую эпоху. [1] Но и сам Тредгольд и другие исследователи паровых машин обыкновенно вводили в свои сочинения, кроме формул, просто таблицы, заключавшие или просто результаты наблюдений или эти же результаты, обработанные и иногда экстраполированные по каким-либо формулам. Иногда эти экстраполяции поражают своей необоснованностью и смелостью. Так, например, у Понселе, пользующегося до 24 атм. данными Дюлонга и Араго, таблица экстраполирована до 50 атм., [2] а в сочинении Арменго [3] приведена чрезвычайно курьезная таблица для насыщенного пара до 1000 атм., причем при этом давлении температура принята равной 516,73° (в настоящее время найдена критическая температура воды, равная 374° и соответствующее ей давление, равное 225 атм.; выше этой температуры пар не может обращаться в жидкое состояние, т. е. не может быть насыщенным). Но, как бы то ни было, ближайшие потребности практики были удовлетворены приведенными опытами, а получение более точных данных явилось делом позднейших эпох.

Относительно определения удельного объема сухого насыщенного пара мы говорили уже о довольно точном значении его, найденном Уаттом для давления в 1 атм. Долгое время для определения плотности и удельного объема сухого насыщенного пара пользовались законами Бойль-Мариотта и Гей-Люссака, выведенными для газов. [4]

Более точные опыты, произведенные Гей-Люссаком в 1811 г. [5] показали неточность этого предположения.

В тесной связи с вопросом о связи между давлением и плотностью пара находится вопрос о расширении пара в цилиндре паровой машины после отсечки. Уже Тредгольд принимает за линию этого расширения равнобокую гиперболу и выводит соответственные формулы для работы. [6] Тот же закон принимает Понселе и другие авторы. [7] При этом обыкновенно принималось, что при расширении пар остается сухим и насыщенным.

Что касается до количества тепла, необходимого для получения пара, то теплоту жидкости принимали равной численно температуре, т. е. принимали теплоемкость воды равной единице. Явление скрытой

---

[1] Формула Тредгольда имеет такой вид (пересчитанная на французские меры)

$$f = \left(\frac{t + 73}{84}\right)^6$$

f — давление в сантиметрах рт. ст.

t — температура в градусах Цельсия.

Она довольно проста, но не согласуется с позднейшими опытами. Большинство других формул отличается крайней сложностью и неудобны для вычислений.

[2] J. Poncelet. Cours de mécanique appliquée aux machines. Paris, 1876 (посмертное изд. ч. II, стр. 227).

[3] Armengaud. Traité des moteurs. Paris, 1861, т. I, стр. 14.

[4] Так делает, например, Понселе; см. цит. соч., т. IV, § 75.

[5] Gay-Lussac. Annales de chimie, 1 сер., т. III, стр. 218.

[6] Тредгольд. Цит. соч., стр. 245.

[7] Понселе. Цит. соч., т. 2, стр. 233.

теплоты было открыто еще Блеком [1] и величина скрытой теплоты при атмосферном давлении была определена Блеком еще в 1762 г.; определение это было повторено Уаттом и имело большое значение для уяснения процессов, происходящих в паровых машинах. Число, найденное Уаттом (533 кал/кг.), довольно хорошо сходится с позднейшими данными, полученными Реньо (536,5). Однако зависимость скрытой теплоты от температуры (а, следовательно, и давления) парообразования не была выяснена и долгое время колебалась между 2 предположениями: 1) что скрытая теплота водяного пара есть постоянная величина («закон Соутерна», 1803 г.) [2] и 2) что полная теплота испарения (т. е. сумма теплоты жидкости и скрытой теплоты) есть величина постоянная [3] (закон, называемый законом Уатта и подтверждаемый опытами Клемана и Дезорма (Clément et Desormes —1819 г.). Эти предположения (несмотря на свою неверность) долго держались в науке. Их находим, например, у Понселе, склоняющегося к закону Соутерна. [4] Они были окончательно опровергнуты только позднейшими опытами Реньо, начатыми в 40-х годах, о которых мы будем говорить в другом отделе. В общем, сведения о парах в первых десятилетиях XIX в. хотя не отличались ни полностью, ни точностью, но были все же более или менее пригодны для производства основных расчетов в области теории паровой машины.

Определение работы пара в паровой машине

Мы говорили уже, что Уаттом были выработаны чисто эмпирические правила для определения главных размеров паровых машин. Тредгольд один из первых дал метод теоретического подсчета работы паровой машины с расширением пара, для чего он применяет формулу для работы расширения по закону равноосной гиперболы. [5] Но для практических расчетов он дает правила, основанные на опытных коэффициентах для различных категорий машин. Так, например, для определения мощности машин без конденсации дается такое правило: [6] нужно умножить разность $^6/_{10}$ избыточного давления в котле над атмосферным и 0,4 атмосферного дав-

[1] E. Mach. Principien der Wärmelehre, стр. 174 и след. Опыты Блека описаны в книге Блека «Lectures of chemistry», т. I, стр. 156. Другие ранние опыты над определением скрытой теплоты испарения приведены у Robison в «Mechanical Philosophy», т. II, стр. 160.

[2] Thenard. Traité de chimie, т. 1, стр. 78.

[3] Robison. Mechanical philosophy, т. II, стр. 160.

[4] Понселе. Цит. соч., т. II, стр. 229—230. В сочинении F. Mathias et Ch. Callan «Etudes sur la navigation fluviale par la vapeur», Paris, 1848, авторы склоняются, наоборот, к закону Клемана.

[5] Тредгольд. Цит. соч., §§ 302—311.

[6] Это правило мы приводим в метрических мерах, как оно дано Маллетом во французском переводе книги Тредгольда (цит. соч., стр. 276). Маллету же принадлежат многочисленные исправления теоретических рассуждений Тредгольда, иногда поражающих своей необоснованностью и противоречием с основами механики, например, вычисление работы машин с непрерывным вращательным движением (§§ 312—316), рассуждение о наибольшей работе, даваемой машинами с маховиком (§§ 332—337) и др.

ления на квадрат диаметра цилиндра (оба давления выражены в кг/см^2) и на скорость поршня в метрах в минуту. Произведение дает среднюю (эффективную) работу паровой машины в килограммо-метрах в минуту; для получения мощности паровой машины в лошадиных силах нужно разделить это произведение на число 4 500.

Аналогичные правила даются и для других видов паровых машин: машин низкого давления простого действия с конденсацией (типа Уатта),[1] машин низкого давления двойного действия,[2] машин с 2 цилиндрами.[3] Очевидно, что такие правила (сами по себе не бесполезные) годятся только для известных нормальных параметров работы машины.

Той же цели — созданию простого правила должно было служить еще более упрощенное универсальное понятие «номинальной» лошадиной силы. В определении этого понятия, введенного Уаттом и Болтоном, исходили из следующих определенных параметров для стационарных паровых машин, выраженных в английских мерах: избыточное давление принимается равным 7 англ. фунт. на 1 дм^2, средняя скорость принималась равной 128 фут. в минуту. Для номинальной мощности давалась первоначально формула[4] (33 000 фунто-футов в 1 мин. =1 л. с.)

$$N_{\text{номин.}} = \frac{7 \cdot 128 \sqrt[3]{\text{хода поршня в фунтах} \cdot \text{площ. поршня в дм.}^2}\ \text{л. с.}}{33\,000}.$$

После преобразования эта формула дает:

$$N_{\text{номин.}} = \frac{\sqrt[3]{\text{хода поршня в футах} \cdot \text{диаметр}^2\ \text{(в дюймах)}}\ \text{н. л. с.}}{47}.$$

Для пароходных машин давали аналогичную формулу (с принятием скорости поршня равной 220 фут./мин.).[5]

$$N_{\text{номин.}} = \frac{\frac{\pi \times D^2}{4} \cdot 7 \cdot 220}{33\,000} = \frac{D^2}{27{,}28}\ \text{н. л. с. } (D \text{ — в дюймах})$$

Формулы эти скоро стали мало пригодны вследствие изменения условий работы и стали давать номинальную мощность, чрезвычайно отличную от индикаторной (или эффективной).[6] Однако они удержались очень долго и применялись с разными изменениями даже до 80-х и 90-х годов.

В формуле английского адмиралтейства для судовых машин вводилась, например, средняя скорость поршня, и формула получала вид:[7]

$$N_{\text{номин.}} = \frac{D^2 v}{6000}\ \text{л. с.}$$

D — в дюймах, v — в фут/мин.

[1] Тредгольд. Цит. соч., стр. 302—303.

[2] Там же, стр. 308.

[3] Там же, стр. 314.

[4] Rankine, W. Manual of the steam engine, стр. 479.

[5] Матчосс, т. I, стр. 748.

[6] Индикаторная мощность получалась в 3—4 раза больше номинальной, а иногда даже до 9 раз больше номинальной. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleisses, 1897, стр. 78.

[7] Rankine, W. Manual of the steam engine, стр. 480.

Локомобили даже в 90-е годы обозначались номинальной мощностью, которая определялась по формуле:[1]

$$N_{\text{номин.}} = \frac{D^2}{10} \text{ н. л. с.}$$

D — в дюймах.

Все эти формулы давали результаты, совершенно непригодные и в заключение самое понятие номинальной мощности было оставлено. Однако еще в 1886 г. в статье проф. Н. Ф. Лабзина [2] данные о судовых машинах приводятся в номинальных и индикаторных силах, причем отношения индикаторной мощности к номинальной колебались от 2,2 до 6,8, что наглядно показывает полную устарелость понятия номинальной мощности.

Возвращаясь к основному расчету работы паровой машины, заметим, что в наиболее систематизированном виде (свободном от явных ошибок Тредгольда) он дан был Понселе. Последний дает формулы для индикаторной мощности и вводит в них практические поправки для разных категорий машин. Он дает далее теоретический расход пара и угля на одну лошадиную силу, причем для машины Уатта низкого давления у него получаются цифры расхода пара около 32 кг/лсч, а угля—5—6 кг/лсч; для машин Вульфа двойного расширения получается расход пара 11,38 кг/лсч и угля около 2 кг/лсч.

Заметим, что и Тредгольд и Понселе уже упоминают об охлаждающем действии стенок, [3] но не придают этому явлению того крупного значения, которое оно имеет на расход пара, и которое выяснилось значительно позже, в конце 50-х годов.

Кроме основного вопроса о работе пара в паровой машине у Тредгольда и у Понселе довольно точно определяется количество охлаждающей воды в конденсаторе.

Таким образом, задача об определении мощности и об установлении главных размеров была более или менее точно решена для типов стационарных машин, находившихся тогда в употреблении, у которых имелась определенная нормальная мощность и нормальное число оборотов. Но для паровозных машин задача получается гораздо более сложная, так как скорость движения у них переменна, а в связи со скоростью меняется и

---

[1] В. И. Гриневецкий. Отчет по экспертизе локомобилей. М., 1898, стр. 214/42 и след.

[2] Н. Ф. Лабзин. Машины и аппараты. Сборник «Историко-статистические сведения о промышленности в России», стр. 44.

[3] Понселе. Цит. соч., ч. II, стр. 252.

Тредгольд рассматривает только внешнее охлаждение через стенку цилиндра и дает приблизительную цифру для потери тепла через стенку (5/105 полного количества тепла, принесенного паром; см. цит. соч., § 157 и 329). Рассмотрение только этой внешней потери приводит его к заключению о бесполезности паровой рубашки в цилиндре, предложенной Уаттом. Истинное значение паровой рубашки было выяснено тоже позже.

число оборотов, и мощность, и расход пара. Задача такого расчета представляет динамическую проблему весьма сложную. Постановка этой задачи принадлежит де Памбуру, поэтому она долгое время носила название «задачи де Памбура» (например, у Ренкина «Pambour's problem»). [1] Он изложил ее постановку и свое решение сначала в «Трактате о паровозах», вышедшем в 1835 г., [2] а затем повторил это решение в некоторых мемуарах и в «Теории паровых машин», [3] 1838 г. В книге этой он резко критикует «метод коэффициентов», данный Тредгольдом (и частью принятый и у Понселе).

Труды Памбура встретили поддержку в работах Навье [4] и некоторых английских авторов.

Несмотря на возражения Понселе,[5] задача де Памбура удержалась в науке и является (в крайне усложненном виде) и теперь одной из основных проблем теории паровозов.

Вся теория паровых машин, созданная до 1850 г. и характеризованная в настоящей главе, носит чисто конкретный характер, связанный с определенными эмпирическими законами, принятыми для паров. В совершенно ином направлении дается теория тепловых двигателей в знаменитом мемуаре С. Карно [6] «О движущей силе огня», напечатанном в 1824 г. Там разбираются, главным образом, самые общие вопросы, касающиеся тепловых двигателей: значение рабочего тела, условия наивыгоднейшего теплового процесса в двигателях — эти вопросы являются основными в общей термодинамике, а не в специальной теории паровых машин. Поэтому мы будем говорить о работе Карно позже, когда будем касаться вообще влияния термодинамики на теорию тепловых двигателей. В работе С. Карно содержится также много очень верных замечаний, касающихся специально паровых машин, [7] но они, как и общие соображения С. Карно, остались совершенно незамеченными при своем появлении и не оказали никакого влияния на развитие паровых машин в ближайшие десятилетия.

Проблемы динамики и вопросы прочности в паровых машинах

Подробное изложение этих вопросов относится к общей истории прикладной механики и мы ограничимся здесь только некоторыми указаниями. Из вопросов динамики в стационарных паровых машинах того времени с их небольшой скоростью вращения имели важное значение только вопросы о достижении возможной равномерности вращения, т. е. вопросы о маховом колесе и о центробежном регуляторе.

---

[1] Rankine, W. Manual of the steam engine, § 293.

[2] De Pambour. Traité des locomotives, Paris, 1835.

[3] В нашем распоряжении имеется 2 издание: De Pambour. Théorie des machines à vapeur, 2-édition, Paris, 1844.

[4] Navier. Annales des Ponts et Chaussées, 1835.

[5] Poncelet. Comptes rendus, 1843.

[6] S. Carnot. Réflexions sur la force motrice du feu. Paris, 1829.

[7] А. А. Радциг. С. Карно и его «Размышления о движущей силе огня». Архив истории науки и техники, т. III, 1934.

Вопрос о маховых колесах был одним из первых, поставленных в выделившейся в самостоятельную дисциплину в начале XIX в. прикладной механике. Им занимался уже Навье (в своем издании Белидора[1] и в некоторых других работах), но систематически этот вопрос изложен был Понселе, [2] давшим аналитические методы нахождения массы маховика для различных частных случаев.

Морен в своем курсе прикладной механики дал графический метод для нахождения массы маховика («построение диаграммы касательных усилий»), [3] который вошел во всеобщее употребление и до самого новейшего времени являлся самым распространенным способом для решения рассматриваемой задачи. Этот метод быстро вытеснил эмпирические правила для нахождения веса маховика, даваемые различными английскими и американскими авторами (Уаттом, Эвансом, Тредгольдом, Муреем, Вудом и др.). [4] Меньшее практическое значение получила теория центробежных регуляторов, хотя она была разработана (в отношении статики) тем же Понселе: [5] вопрос о работе регулятора так тесно связан с динамикой всей машины, что чисто статическое исследование регулятора, сделанное Понселе (и долгое время повторяемое другими авторами) оказывается далеко недостаточным, и при конструировании регуляторов главную роль играл прямой опыт.

Из других вопросов динамики стационарных паровых машин следует упомянуть о выяснении динамики балансира, сделанном Кориолисом. [6] При малых скоростях, применяемых в балансирных машинах и этот вопрос не имел особенно большого практического значения.

Большое практическое значение имел, напротив, вопрос об уравновешивании движущихся взад и вперед частей в паровозах. Основным вопросом здесь является вопрос о противовесах. Впервые вопрос был поставлен для парового автомобиля, построенного в Англии Гитоном (Heaton) в 1831 г.: при 160—180 оборотах в минуту он делал такие колебания, что невозможно было удержаться на местах сидящим на них пассажирам; для ослабления этих колебаний он применил противовесы, посаженные на продолжении кривошипа (в 1838 г.). Позже тот же Гитон предложил применять противовесы в паровозах.[7] Однако, в употребление они вошли только в 40-х годах. В ту же эпоху предлагались и другие средства для уравновешения паровозов, именно устройства с противоположно движущимися поршнями (Бодмера, Гасвеля), которые не нашли широкого

---

[1] Belidor. Architecture hidraulique. Nouvelle édition, 1819, т. I, стр. 384—392.

[2] Poncelet. Cours de mécanique appliquée aux machines, т. I, и отд. I, § 39 и отд. II, §§ 75—106.

[3] Morin. Leçons de mécanique pratique, т. III, Paris, 1846, стр. 312—368.

[4] Понселе. Цит. соч., т. I, § 93.

[5] Понселе. Цит. соч., т. I, отд. I, §§ 17—35.

[6] Coriolis. Sur l'influence du moment d'inertie du balancier d'une machine à vapeur etc. «Journal de l'École Polytéchnique», кн. 21, т. XIII, стр. 228—267.

[7] Engineer, 1880, т. I, стр. 77.

применения. Противовесы же сделались необходимой частью всякого паровоза. Теория их была дана Лешателье.[1] и Кушем [2] (Couche). Основания общей теории колебательного движения паровоза положены были Ивон-Вилларсо (Yvon-Villarceau), [3] Резалем [4] (Resal), Редтенбахером [5] (Redtenbacher), Цейнером (G. Zeuner) [6] и др.

Что касается вопросов прочности в паровых машинах, то в рассматриваемую эпоху теорией было разобрано мало специальных вопросов, касающихся паровых машин и практика обходилась чисто эмпирическими правилами, данными, например, Тредгольдом.[7] Только в конце рассматриваемого периода начат был систематический пересмотр правил расчета деталей машин вообще и их теоретического обоснования; задача эта исполнена была Редтенбахером.[8]

В заключение настоящей главы скажем несколько слов о теории паровых котлов. В этом отношении в рассматриваемом периоде не было сделано почти ничего: как размеры поверхности нагрева, так и прочные размеры котлов определялись по чисто эмпирическим правилам. [9] Даже в значительно позже написанной книге Рюльмана делаются только ссылки на эмпирические правила, предлагаемые разными авторами, в том числе — еще Уаттом. [10]

Надо добавить, что во многих вопросах котельного дела этот эмпиризм держался до самого новейшего времени.

---

[1] Le Chatelier. Etudes sur la stabilité des machines locomotives en mouvement, Paris, 1849.

[2] Couche. Les contre-poids appliqués aus roux motrices des locomotives. Annales des mines, стр. 427, 1853.

[3] Yvon-Villarceau. Theorie de la stabilité des machines locomotives en mouvement. Paris, 1852.

[4] Resal. Note sur la stabilité des machines locomotives en mouvement, Paris, стр. 411. 1853.

[5] Redtenbacher. Die Gesetze des Locomotivebaues, Mannheim, 1855.

[6] Rodtenbacher. Ueber das Wanken der Locomotiven. Zürich, 1862.

[7] Тредгольд. Цит. соч., § 496 и след.

[8] Redtenbacher. Resultate für den Maschinenbau. Mannheim, 1860.

[9] Такие правила приведены, например, у Понселе. Цит. соч., т. I, стр. 2, § 110—116.

[10] M. Rühlmann. Allgemeine Maschinenlehre. B. I, Braunschweig, § 103. 1852.

ТРЕТИЙ ПЕРИОД

ТЕПЛОТЕХНИКА

ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX И В НАЧАЛЕ XX СТОЛЕТИЙ

Глава I

СОЗДАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ТЕОРИЯ ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Машины Корлисса

Нам пришлось говорить уже несколько раз о развитии машиностроения в Соединенных Штатах, представлявшем большие отличия от машиностроения в Европе. Так, уже в конце XVIII столетия там создается Эвансом тип паровых машин высокого давления; в начале XIX в. там создается совершенно самостоятельно пароходная машина; наконец, в 30-х годах XIX столетия там начинают строиться паровозы, тоже представляющие большие отличия от европейских. Не останавливаясь на этом подробно, подчеркнем, что эти особенности американского машиностроения находятся в тесной связи с особенностями экономического развития Соединенных Штатов.

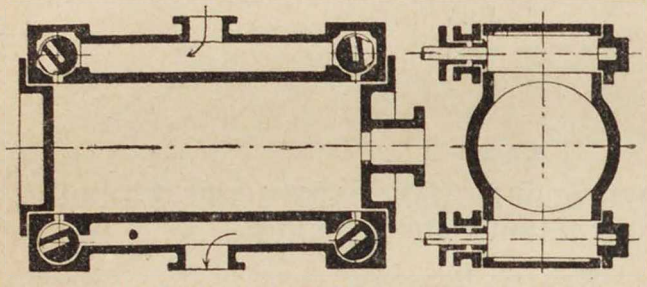
В конце 40-х годов в Соединенных Штатах появляется новый тип паровой машины. Создание этого типа машины принадлежит Корлиссу (George Henry Corliss), который имел в Америке же в начале 40-х годов некоторых предшественников: Сикельс (Sickels), Гогг (Hogg), [1] но последние не добились крупных улучшений.

Корлисс начал свои занятия паровой машиной в 1846 г. [2] Он внес в паровую машину многочисленные усовершенствования: создал новый тип рамы для горизонтальных машин, изменил конструкцию вертикальных и балансирных машин, внес большие усовершенствования в изготовление деталей паровых машин. Но главная заслуга его заключается в создании новой системы пароораспределения при помощи вращающихся кранов с изменением степени наполнения непосредственно от регулятора. Выгодность применения расширения в паровых машинах, как было нами

[1] B o u l v i n. Cours de mecanique appliquée aux machines.5-me fascicule,стр. 279.

[2] Корлисс родился в 1817 г. в Нью-Жерсее, в Соединенных Штатах, и получил низшее образование в народной школе, но затем пополнил свои знания самостоятельными занятиями. Свои конструкторские способности он проявил сначала на усовершенствовании швейных машин для обуви. Заниматься паровой машиной он начал в 1846 г.и первый патент на предложенные им усовершенствования он получил в 1849 г. Машины, изготовленные на его фабрике (основанной в 1844 г.), скоро приобрели широкую известность и были награждены высшими наградами на всемирных выставках в 1867 и 1873 гг. Он умер в 1888 г.

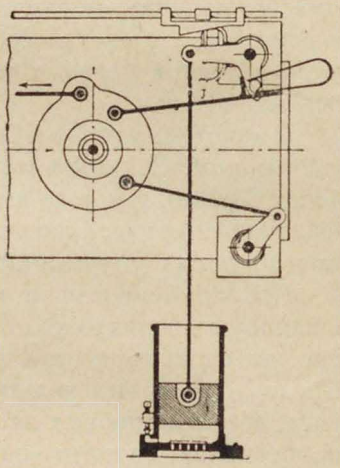
уже указано, понималась хорошо уже Уаттом и в первой половине XIX в. расширение пара в цилиндре сделалось неотъемлемой принадлежностью паровых машин. Но в большинстве конструкций степень наполнения была постоянной, а регулирование достигалось торможением пара посредством дроссель-клапана. Правда, были предложены некоторые системы парораспределений, допускавших переменное наполнение; [1] из них — распределение Мейера в обыкновенной конструкции дает возможность изменять степень наполнения только от руки, распределение же Фарко, хотя и изменяет степень наполнения от регулятора, но применимо только для медленно ходящих горизонтальных машин.



Фиг. 90

Первый патент Корлисса был взят 10 марта 1849 г. на 14 лет, в 1851 и в 1859 гг. он взял новые патенты на различные внесенные им изменения. В общем, им предложено 7 систем парораспределения, отличающихся деталями, но схожих по основным особенностям конструкции.

Цилиндры машин Корлисса имеют 4 крана, расположенные по 2 с каждой стороны поршня (фиг. 90); один из них служит для впуска, другой —для выпуска пара; краны эти имеют вращательное движение от рычагов, на них насаженных и получающих движение от внешних распределительных органов. Последние имели вид, изображенный схематически на фиг. 91.



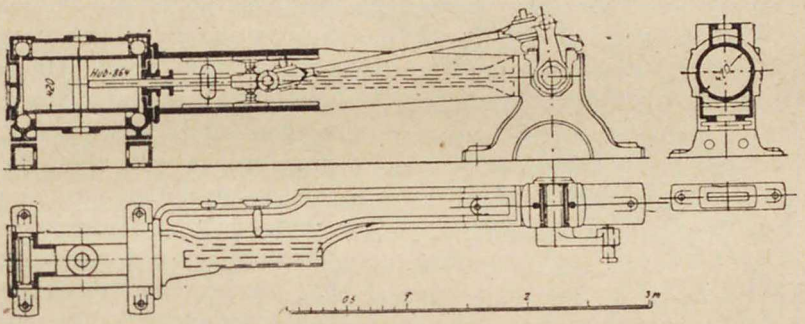
Фиг. 91

По середине цилиндра укреплялся вращающийся круг, приводимый в движение от тяги, соединенной эксцентриком, который насажен был на главном валу машины. От этого круга шли тяги, приводившие в движение краны. Тяга в выпускному крану представляла сплошной стержень, сообщавший этому крану качательное движение в обе стороны. Тяга же к впускному крану действовала на штифт, находящийся на последнем («пассивная зацепка») посредством выступа, помещенного на тяге («активная зацепка») и соединенного с пружиной, прижимающей активную зацепку к пассивной. В своем движении влево тяга встречала штифт, упирающийся в наклонную плоскость; эта плоскость соединялась с регу-

[1] Описанные нами в главе I I (второго периода)

лятором и могла перемещаться под действием последнего. Это перемещение меняло момент воздействия вертикального штифта на тягу, вызывающего понижение последней и разрыв соединения между активной и пассивной зацепками.

Тяга с грузом, прикрепленная к другому концу рычага, насаженного на ручку крана, заставляла быстро падать последний, причем происходила отсечка. Эта быстрота закрывания, свойственная парораспределению Корлисса, а затем и всем позднейшим «расцепным» распределениям, дала основание называть такие распределения «точными» (по-немецки «Präcisionssteuerungen»). Это быстрое закрывание выражается на индикаторной диаграмме, резко обозначенной точкой начала расширения в отличие от золотниковых машин, в которых это закрывание делается очень медленно и на диаграмме получается плавный переход от линии впуска к линии расширения.



Фиг. 92

Мы не останавливаемся на других системах парораспределений, предложенных Корлиссом и другими конструкторами после истечения сроков его патентов (в 1870 г.). [1]

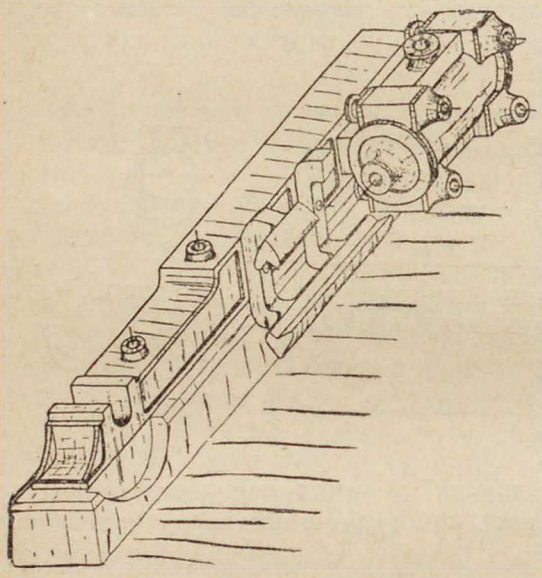
В позднейших парораспределениях Корлисса закрывание кранов делалось вместо груза давлением наружного воздуха на поршень, создававший в особом цилиндре разреженное пространство при подъеме вверх.

Из других особенностей машин Корлисса надо указать на раму для горизонтальных машин: вместо прежней симметричной рамы, целиком лежащей, вместе с цилиндром, на фундаменте, он ввел одностороннюю раму, лежащую свободно на двух опорах, а в тяжелых машинах — опирающуюся также на фундамент, но со свободно прикрепленным к ней цилиндром. Эти конструкции перешли и в более поздние машины. Примеры этих конструкций рам приведены на фиг. 92 и 93.

[1] Чертежи различных типов Корлиссовских распределений имеются в книге Uhland. Corliss-und Ventil-Dampfmaschinen, Leipzig, 1879. Более поздние конструкции кранных парораспределений приводятся в отчетах о всемирных выставках: Венской —1873 г., 1876 г.— в Филадельфии (Радингер — Radinger), 1878 г.— в Париже (Ридлер—Riedler), 1889 г.—в Париже (Buchetti) и 1900 г. (Eude). Об этих позднейших кранных распределениях подробные сведения имеются также в сочинении Buchetti. Les machines à vapeur actuelles, Paris, 1900.

О вертикальных и балансирных машинах, которые тоже строил Корлисс, мы скажем дальше.

Паровые машины Корлисса, благодаря своему способу регулирования, а также очень малым вредным пространствам (являющимся особенностью кранных парораспределений) и очень хорошему исполнению отличались малым расходом пара. Так же как и Уатт, оплату своих машин Корлисс производил за счет экономии, даваемой ими по сравнению с заменяемыми старыми машинами. Этот способ оплаты оказался очень выгодным для Корлисса, так как экономия в расходе угля получалась значительная, что видно из следующих примеров: в 1855 г. он поставил свою машину в 180 л. с. на одну мельницу, на которой заменил ею прежнюю машину, причем за свою машину и котлы к ней Корлисс должен был получать 5-кратную стоимость годичного сбережения угля. Оказалось, что старая машина потребляла в среднем 10 483 англ. фунт. в день, тогда как машина Корлисса потребляла только 5 690 англ. фунт. Принимая цену угля равной 6 долларам за тонну, окажется, что экономия в год составляет 4 000 долларов, т. е., согласно условию Корлисс, за машину в 180 л. с. получил 20 000 долларов. Убедившись в высоких качествах своих машин, Корлисс заключал крайне смелые договоры на поставку их, включая в них крупные неустойки в случае неисполнения условий гарантии. Так, в одном из договоров на поставку 200-сильной машины, за которую покупатель заплатил 7 000 долларов, он обязался уплатить 5 000 долларов за каждую тонну перерасхода угля в день сверх 4 т, хотя старая заменяемая машина расходовала 9 т в день.



Фиг. 93

Этот малый расход топлива получался не только вследствие указанных особенностей машин Корлисса, но также вследствие большого внимания, уделяемого Корлиссом котельной установке. Он понимал важное значение сухости пара, поступающего в машину. Чтобы иметь его сухим, Корлисс применял даже небольшой перегрев в котле (градусов на 30); кроме того он допускал только малое напряжение поверхности нагрева (6 кг с 1 м^2 в час).

Все эти обстоятельства дали возможность Корлиссу снизить расход пара до 6,4 кг в час и угля — до 0,63 кг в час на индикаторную лошадиную

силу. [1] Кроме малого расхода пара, машины Корлисса отличались большой равномерностью хода (благодаря своей системе регулирования), что делало их особенно ценными для текстильных фабрик (в которых от равномерности хода зависит качество продукта). Эти качества машин Корлисса дали им возможность быстро победить первоначальное недоверие и завоевать прочное положение сначала в Америке, а потом и в Европе.

Сроки патентов Корлисса истекли в 1870 г., и тогда построение машин Корлисса получило широкое распространение в Соединенных Штатах и в Европе. Прежде чем говорить об этом распространении, скажем еще несколько слов о постройке Корлиссом балансирных машин. Он строил их для больших мощностей при ходе поршня, большем 900 мм.

Из этих балансирных машин Корлисса особенной известностью пользуется машина, построенная им для всемирной выставки 1876 г. в Филадельфии. Машина эта, описанная подробно в отчете проф. Радингера, [2] действительно поражает своей грандиозностью: высота ее была равна 13½ м, вес — 607 т, мощность — 2 500 л. с. Машина состояла из 2 балансирных машин, работающих при помощи кривошипов, закрепленных под углом в 90° друг к другу на один вал. Между этими машинами помещалось громадное зубчатое колесо, служащее для передачи работы к трансмиссии; колесо это имело диаметр равный 9,052 м, причем скорость на окружности достигала величины необычайной для Европы, равной 17,06 м/сек. Благодаря тщательной обработке зубцов, машина отличалась бесшумным ходом, несмотря на гигантские размеры зубчатого колеса, по выражению Радингера, «самого лучшего и большого когда-либо построенного человеком». Машина эта изображена на фиг. 94.

В Соединенных Штатах одна из первых больших фабрик, занявшихся постройкой машин Корлисса, была фабрика, основанная Аллисом в Мильвоке, позже перешедшая в собственность акционерной компании, которая под именем Аллис-Чальмерс (Allis-Chalmers) существует и в настоящее время (являясь одним из главных американских заводов по производству паровых турбин).

Конструктором на этом заводе являлся Рейнольдс (Reynolds), которому принадлежит одно из видоизменений парораспределений Корлисса.

---

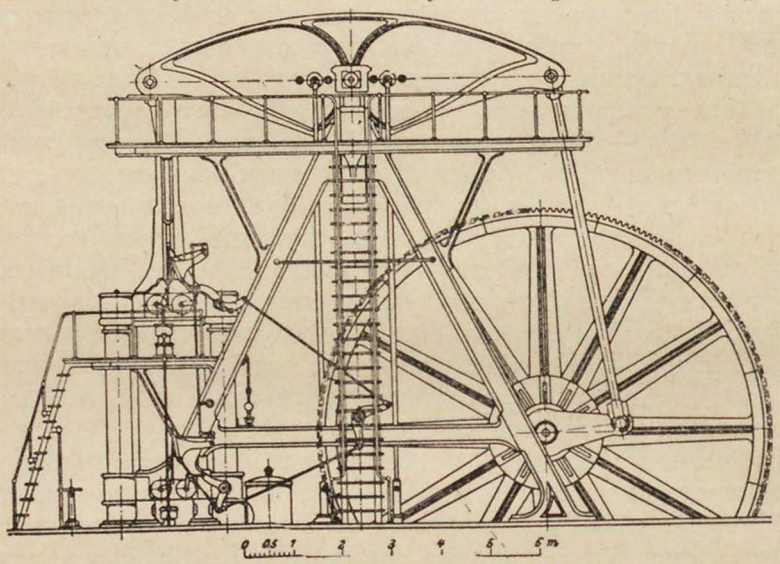
[1] В известных опытах Деляфона (Delafond), исполненных в 80 годах с машиной с Корлиссовским распределением, построенной в Крезо на заводе Шнейдера, получался минимальный расход пара около 7,5 кг на индикаторную лошадиную силу в час. D e l a f o n d. Essais effectués sur une machine Corliss aux usines de Cresot. Annales des mines, 1884.

[2] R a d i n g e r. Dampfmaschinen und Transmissionen in den Vereinigten Staaten von Nord-America. Wien, 1878.

В этом крайне интересном отчете, касающемся всех типов американских машин, Радингер отмечает уже как одну из причин особенностей их конструкции и постановки их производства — высокую заработную плату и некоторые экономические особенности Соединенных Штатов. К этому же заключению пришли и наиболее вдумчивые составители отчетов о позднейших американских выставках (В. Л. Кирпичев, Ридлер и Гутерм ут).

В Европе первые машины системы Корлисса были построены Отто Мюллером в 50-х годах, но большое распространение они получили тоже в 70-х годах. Их постройкой в Англии много занимался завод Гик-Гаргривс (Hick — Gargreavs) в Болтоне, во Франции — Фарко (Farcot) в Париже и Шнейдер (Schneider) в Крезо, в Бельгии — Ван ден Керхове (в Генте), в Швейцарии — Эшер—Висс (последний впрочем — позже) и многие другие.

На всемирной выставке в Париже в 1878 г. было только 6 машин с парораспределением Корлисса и преобладали машины с золотниковым парораспределением, на выставке 1889 г. машины Корлисса составляли большинство; это был кульминационный пункт их развития.[1] С развитием



Фиг. 94

применения в паровых машинах высокоперегретого пара в середине 90-х годов применение кранных парораспределений пошло на убыль, так как кран является мало пригодным органом парораспределения для высоко перегретого пара, но еще на выставке 1900 г. в Париже машин с кранными распределениями было много, [2] они встречаются еще и сейчас в большом количестве на заводских станциях с ременной и канатной передачей в Америке и Англии. В России машины с распределением Корлисса не строились, но они были распространены на русских текстильных фабриках, так как последние строились долгое время преимущественно англичана-

[1] Boulvin. Cours de mécanique appliquée aux machines. 5 fascicule, стр. 158. См. также описание наиболее интересных типовых машин на выставке 1889 г. в Париже, сделанное Л. Фигье (L. Figuier, L'éxposition de Paris, т. III—IV, стр. 283, 1889).

[2] «Mécanique à l'éxposition de 1900». 3-me livraison. Etude. Machines à vapeur, Paris, 1902. Сведения об этих машинах имеются также в статье Н. А. Быкова в «Вестн. общ. техн». На выставке было 17 машин с кранными распределениями, преимущественно французских заводов, но также одна бельгийская, одна швейцарская и одна английская.

ми.[1] С уменьшением влияния английского капитала в России в этой области английские кранные машины стали вытесняться клапанными немецкими и особенно швейцарскими завода Зульцера. Но даже в новейшее время можно было видеть огромные, тяжелые кранные английские машины на текстильных фабриках в Ленинграде, постепенно оставляемые вследствие перехода на электрическую энергию.

В позднейших машинах с кранным распределением [2] усилия конструкторов были направлены главным образом на усовершенствование распределения. Эти усовершенствования делались в двух направлениях: 1) упрощение распределения и 2) изменение распределения с целью создания большей степени наполнения. Из изменений 1-го рода известностью пользовалось распределение по патенту Инглиса и Спенсера (Spencer), созданное инженером Спенсером, применявшееся в машинах, построенных на заводе Гика и Гаргривса и распределение Уилока в Варчестере в штате Массачузетс. Последнее распределение отличается оригинальным расположением кранов, которые помещены по два внизу с каждой стороны цилиндра. Имеется также много американских видоизменений парораспределения Корлисса (Рейнольдса, Фрезер и Чалмерс, Атлас).

Из парораспределений второй категории следует упомянуть о парораспределении Фарко, представленном на выставке 1878 г. и особенно о парораспределении Фрикара, появившемся на выставке 1889 г. и нашедшем там очень высокую оценку. Оно действительно является чрезвычайно остроумным по конструкции и позволяет доводить наполнение до самых больших величин. [3]

Из европейских стран в Германии кранные распределения получили наименьшее распространение; оно было принято только на некоторых австрийских заводах (Рустона в Праге) и применялось также в цилиндрах среднего и низкого давлений многоцилиндровых машин (в которых исполнялось без расцепления под действием регулятора). В Германии всецело господствовали клапанные парораспределения, создателем которых является завод Зульцера в Швейцарии. К характеристике клапанных машин мы переходим в следующем отделе.

Клапанные парораспределения

Обыкновенные примитивной конструкции клапаны являлись, как мы видели, с самых первых времен создания паровой машины одним из часто применяемых органов парораспределения. Но к началу 50-х

[1] Интересные сведения об этом периоде влияния английского капитала в русской текстильной промышленности имеются в статье анонимного автора: «Контора Кнопа и ее влияние». Вестн. Общ. технологов. 1895 г.

[2] Заметим, что эти различные виды кранных распределений все-таки сохранили как основное имя Корлисса (говорят о распределении Корлисс-Спенсер или Корлисс-Гик и т. д.).

[3] Теория парораспределений Фарко и Фрикара изложена в книге Лейста, являющейся самым полным руководством по всевозможным системам парораспределений. C. L e i s t. Die Steuerungen der Dampfmaschinen, стр. 488 и 512, Berlin, 1900 г. 2 издание этой книги (1905 г.) отличается еще большей полнотой.

годов они были в значительной степени вытеснены золотниковыми парораспределениями разных систем. Завод Зульцера, основанный в 1834 г., приступил к постройке паровых машин в 50-х годах. [1] Этой постройкой руководил английский инженер Карл Броун, получивший хорошую подготовку по постройке паровых машин на английском заводе Маудели в Лондоне, бывшем тогда одним из лучших заводов по постройке паровых машин.

Броун ввел в постройку паровых машин ряд усовершенствований, до того времени мало применявшихся на континенте Европы, например, систематическую проверку работы своих паровых машин при помощи индикатора. Броун заботился также вообще о понижении расхода пара в строящихся на заводе Зульцера паровых машинах. Броун находился в близких отношениях с Гирном, который в конце 50-х годов произвел свои известные опыты над применением перегретого пара в паровых машинах, доказавших его выгодность. [2] Броун тоже хотел применить перегретый пар в своих машинах; уже в 1862 г. он сконструировал чугунный ребристый перегреватель для получения перегретого пара. Но при попытках применить перегретый пар к своим машинам Броун встретил затруднения (несмотря на невысокий перегрев применяемого пара) со стороны золотниковых парораспределений, применившихся в этих машинах до того времени. Мысль его естественно обратилась к клапану, как органу более подходящему для применения при перегретом паре. С другой стороны, выяснившиеся к этому времени успехи Корлиссовских парораспределений заставляли думать о применении в клапанных парораспределениях непосредственного воздействия регулятора на отсечку.

Для удовлетворения этим требованиям создана была в 1865 г. первая клапанная машина (вертикальная, мощностью около 200 л. с.), опыты с которой дали очень успешные результаты. В 1867 году горизонтальная клапанная машина Зульцера была выставлена на всемирной Парижской выставке и вызвала там всеобщее восхищение как своей конструкцией, так и исполнением. Затем завод Зульцера начал развивать постройку клапанных паровых машин и до конца 1872 г. построил уже около 100 клапанных машин мощностью от 15 до 200 л. с. В первоначальное парораспределение Броуна вносились все время некоторые изменения, нашедшие свое завершение в создании так называемого «старого» парораспределения Зульцера, осуществленного в машинах, представленных на всемирной выставке в Вене в 1873 г.

Машина Зульцера 1873 г. представляет собой тип, который сохранился во всех позднейших клапанных горизонтальных машинах. Он изображен на фиг. 95.

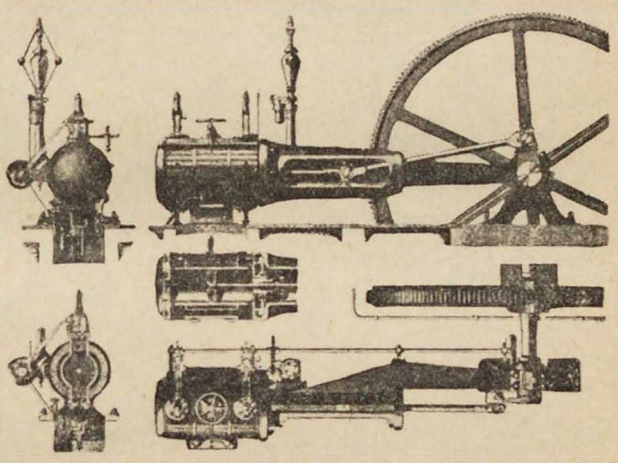
---

[1] Подробные сведения о создании клапанного парораспределения и о его развитии на заводе Зульцера имеются в книге Матчосса (т. II, стр. 30 и сл.). Для составления этого отдела своей книги Матчосс пользовался крайне обстоятельными сведениями, сообщенными ему фирмой Зульцер и инженером Броуном.

[2] О них мы будем говорить в следующей главе.

Рама — «байонетная» [1] с круглым сечением (тип, разработанный Зульцером, так как у Корлисса направляющие крейцкопфы имели призматическое сечение). Передача к распределительным органам сделана от главного вала, помощью зубчатых колес и распределительного валика, идущего вдоль машины и поддерживаемого кронштейнами, прикрепленными к раме. Самое распределение изображено на фиг. 96.

Клапанов — 4, по два для впуска (верхний) и выпуска (нижний) пара с каждой стороны. Передача к выпускному клапану сделана была просто от эксцентрика, передача же к впускному клапану делалась посредством расцепного механизма, момент расцепления которого (а, следовательно, и степень наполнения) изменяется под действием регулятора. [2] После расцепления, пружина, действующая на шпиндель клапана, увлекает последний вниз вместе со всеми передаточными тягами.



Фиг. 95

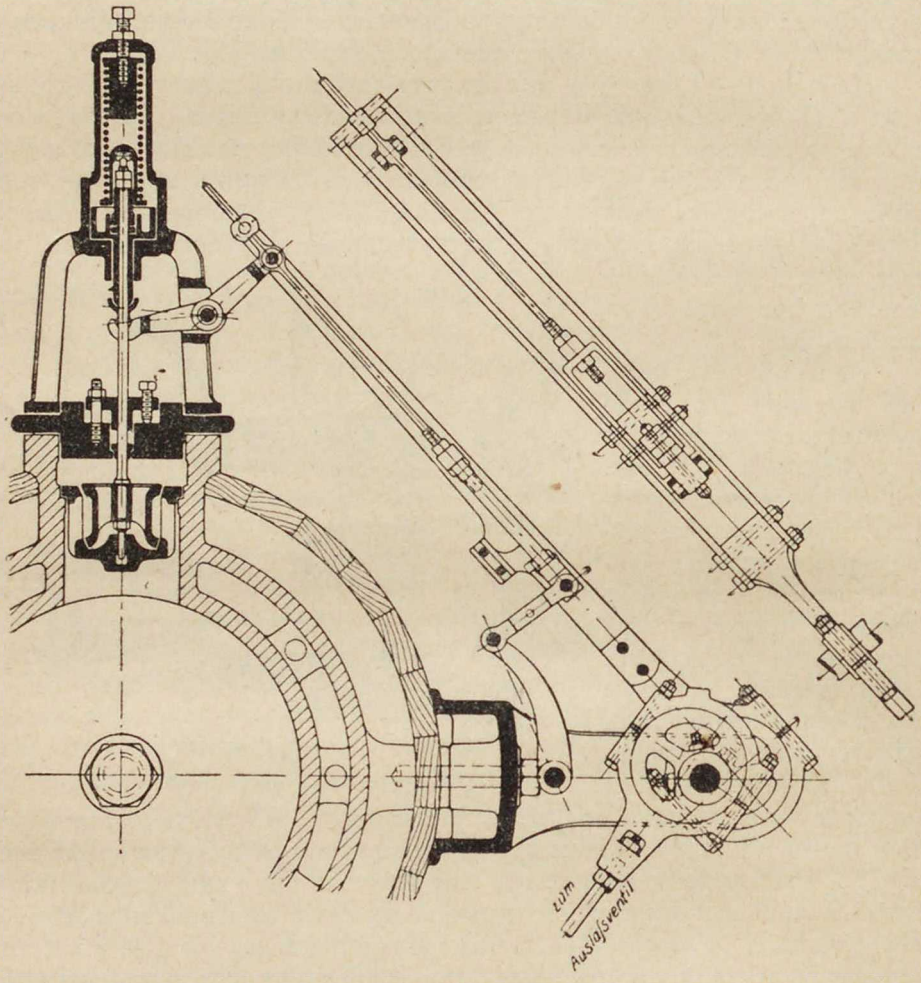
Таким образом, падение клапана на седло происходит с ударом, сопровождаемым стуком. Это распределение Зульцера (как и предшествующее распределение Броуна) является типичным примером целого класса «расцепных» клапанных распределений. Удары при посадке клапанов на седло не давали возможности применять в этих машинах большое число оборотов; так, машина 1873 г. делала только 50 — 60 оборотов в минуту. В этом парораспределении недостатки «расцепного» типа особенно чувствовались, так как действие пружины должно было вызывать не только падение самого клапана и рычага, но и всей тяги к пассивной зацепке. Поэтому сам завод Зульцера занялся вскоре разработкой новых парораспределений и ко времени Парижской всемирной выставки 1878 г. выработал тип распределения, носящий название «нового» распределения Зульцера. В нем от регулятора перемещается не пассивная зацепка, а активная и в падении под действием пружины участвуют только рычаг и клапан. [3] Это парораспределение было еще несколько упрощено в 1889 г.

[1] Т. е. имеющая сходство со штыком (французское baïonette — штык).

[2] В этом парораспределении 1873 г. перемещается от регулятора «пассивная» зацепка.

[3] Наиболее подробным описанием и исследованием свойств клапанных распределений является книга, выше цитированная, Лейста. Относительно многих клапанных распределений данные имеются также в книге Дуббеля — D u b b e l H. Die Steuerungen der Dampfmaschinen. Berlin, 1913, а также в отчетах о выставках и в книге Уланда,

(всемирная Парижская выставка 1889 г.). Все внесенные улучшения все же не позволяли особенно повышать числа оборотов в паровых машинах с клапанным парораспределением. Поэтому к 1900 г., когда развив-



Фиг. 96

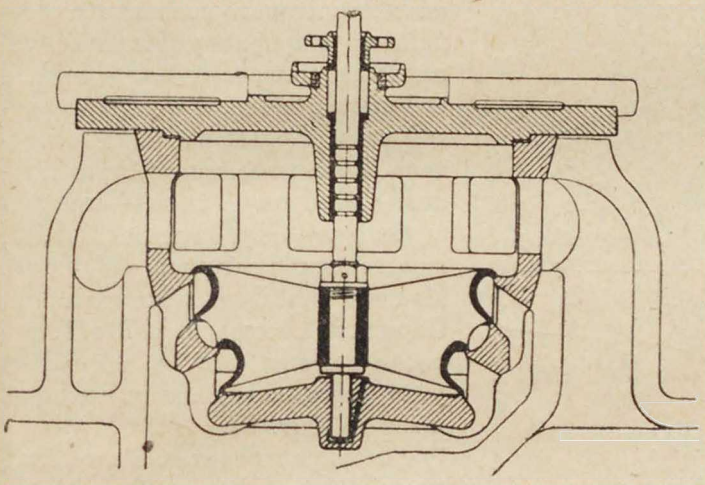
шийся громадный спрос на паровые машины со стороны электрических станций стал настоятельно требовать дальнейшего увеличения числа оборотов, фирма Зульцера предложила еще новое расцепное распределение. Для уменьшения высоты подъема, а, следовательно, и силы удара клапана о седло, клапаны были сделаны не двухседельные, а четырехседельные, как показано на фиг. 97.

упомянутых выше. Важнейшие из клапанных распределений приводятся в подробных курсах паровых машин, например, в курсе проф. С. С. Жирицкого — «Паровые машины», 5 изд., Энергоиздат, 1933 г.

Эта конструкция позволила увеличить число оборотов в машинах с расцепными парораспределениями до 80—100. При этой конструкции клапанов возникают большие трудности в такой точной обработке клапанов и клапанных седел, которая бы обеспечивала плотное прилегание клапана ко всем четырем поверхностям седел; поэтому конструкция многоседельных клапанов не получила большого распространения и большинство фирм применяло двухседельные клапаны.

Клапанные распределения имели большой успех и вызвали целое движение в сторону постройки машин с этим распределением. Это движение было особенно сильно в Германии; здесь клапанных распределений в 70-е и 80-е годы возникло так много, что даже краткий обзор их в настоящей книге невозможен. [1]

Из крупных германских заводов по постройке паровых машин клапанные парораспределения со свободным падением клапана типа вроде Зульцера с некоторыми конструктивными изменениями держались Аугсбургский и Гутегоффнунгс-Гютте; в Бельгии машины с распределением Зульцера строил завод Карельс, [2] в Италии Този. На ряду с этими конструкциями, очень близкими к распределениям Зульцера, строились и многие другие клапанные распределения со свободным падением клапана, у которых клапаны приводились в движение иначе, чем в парораспределениях Зульцера.



Фиг. 97

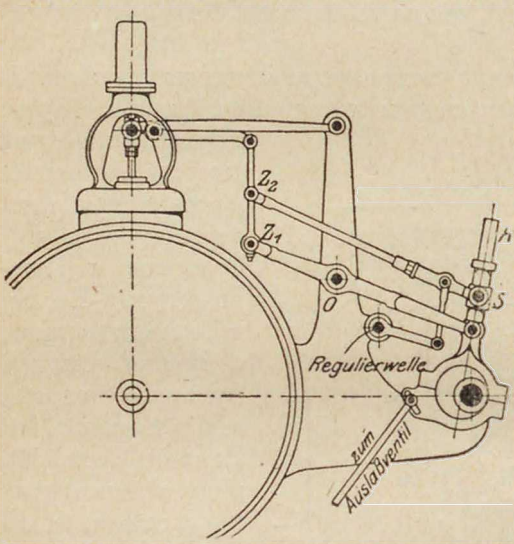
Для дальнейшего развития паровой машины более интересны конструкции со связанным или с принужденным падением клапана («Zwangläufige-Ventilsteuerungen»), которые возникли из сознательного стремления устранить удар при посадке клапана на седло, являющийся неустранимым в системе со свободным падением клапана.

В этих парораспределениях подъем клапана совершается так же, как и в парораспределениях со свободным падением клапана, при помощи

[1] Сведения об этих системах имеются в вышецитированных книгах Уланда и Лейста.

[2] Подробное описание парораспределений завода Карельс имеется в цитированной книге Бульвена, § 110 бис.

системы рычагов, но затем, когда подъем закончился, то начинается не свободное падение, а опускание под действием пружины, но все время задерживаемое той же системой распределительных рычагов. Таким образом, движение клапана является определенным не вполне жестко (как, например, в золотниковых распределениях), а при помощи силы пружины. Это есть, так называемое, «силовое замыкание» движущейся системы, употребляя термин, введенный знаменитым автором кинематики машин, Рело (Reuleaux). Только в некоторых самых поздних системах связанных распределений движение как подъема, так и опускания является жестко определенным при помощи кинематической связи. К ним принадлежит, например, пароораспределение Дерфеля, представленное на выставке в Дюссельдорфе в 1902 г.



Фиг. 98.

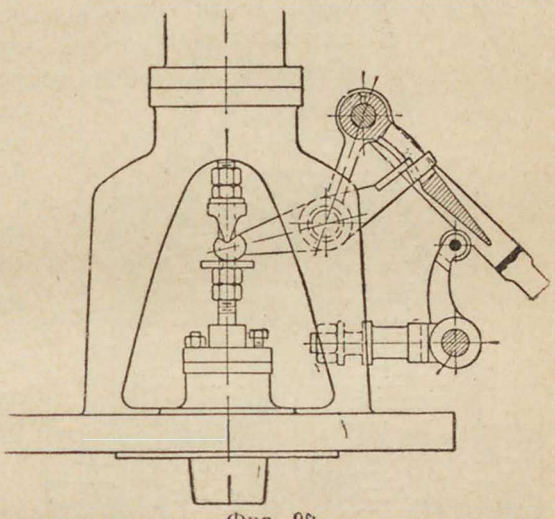
Заслуга сознательного осуществления первого связанного клапанного пароораспределения принадлежит инженеру Кольману (A. Collmann). Машина с пароораспределением Кольмана была исполнена Герлицким машиностроительным заводом (ныне — преимущественно турбинный завод, называющийся «Вумаг» «Wumag»). Машина эта была выставлена на Парижской выставке 1878 г. Пароораспределение это в несколько усовершенствованном виде изображено на фиг. 98.

Пароораспределение это отличалось большой сложностью, [1] но работало очень хорошо и вызвало большое число новых конструкций пароораспределений с принужденным движением клапана. Кольман усовершенствовал также форму самих клапанов с целью придания большей плотности касания поверхностей при их закрывании. Это стремление к созданию новых систем клапанных распределений в течение некоторого времени даже приняло в Германии (и еще больше в Австрии) явно нездоровые формы, так как изобретатели и заводы заботились не о качестве самой машины и даже не о преимуществах конструктируемого пароораспределения, а только о новизне его. Из огромного числа предлагавшихся пароораспределений выделилось несколько своей хорошей работой и сравнительной простотой. К числу их принадлежат (кроме пароораспределения Кольмана) пароораспределения Виднмана (одно из самых простых), Радовановича, Гефнера, Кухенбекера и другие. [2] В некоторых хорошо

[1] Кинематическое исследование пароораспределения Кольмана имеется у Лейста. См. цит. соч., стр. 618 и след.

[2] Лейст. Цит. соч., гл. IV, отд. III.

сконструированных парораспределениях с принужденным падением клапана достигалась, действительно, более спокойная посадка клапана на седло, что позволило в этих машинах поднять число оборотов. Так, например, [1] машина Пражского завода с парораспределением Радовановича на Пражский выставке делала 120 оборотов. Однако, машины с принужденным падением клапана имели свои недостатки. Недостатками рассматриваемого класса машин были, во-первых, большая сложность, являвшаяся результатом трудности разрешения вопроса о воздействии регулятора на изменение степени наполнения при сохранении кинематической связи между распределительным валиком с его эксцентриком и рычагами и другими органами, передающими непосредственно движение к клапану. Второй трудностью при осуществлении клапанных парораспределений являлась величина перестановочного усилия, которое должен был развивать регулятор в периоде изменения степени наполнения: в большинстве парораспределений регулятору приходилось для этой цели передвигать тяжелые массы парораспределительных органов, передавая при этом трение в нескольких шарнирах. Даже при установившемся ходе машины и спокойном состоянии регулятора во многих парораспределениях с принужденным падением клапана возможно обратное давление распределительных органов на регулятор. [2] Такое давление может вызвать нарушение правильного действия регулятора.



Фиг. 99

Все указанные недостатки клапанных парораспределений с принужденным падением клапана заставляли искать новых решений. Первым таким решением было предложение «нового» парораспределения Кольмана (немецкий патент № 8484—1895 г.). Парораспределение это является возвращением к принципу свободного падения клапана. Этот отказ от принципа принужденного падения со стороны их горячего защитника и инициатора введения вызвал к себе большое внимание и целый ряд заводов перешел к постройке машин с этим парораспределением.

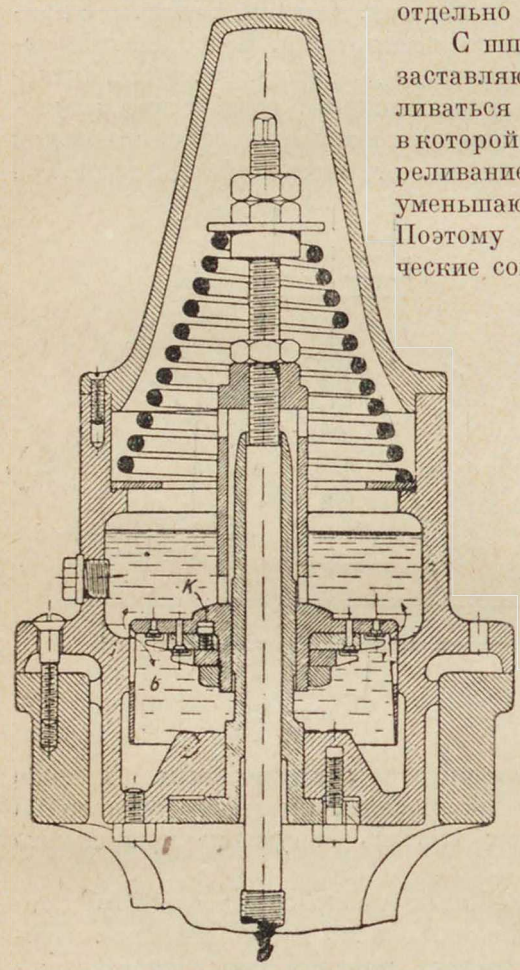
[1] E u d e. Les machines à vapeur etc. стр. 172. На этой выставке была также представлена машина Московского завода Бромлея с самостоятельно разработанным распределением с принужденным падением клапана. Парораспределение это вызвало общее одобрение и описано во многих учебниках (Б у л ь в е н, § 114 бис.), D u b b e l, «Steuerungen», стр. 207.

[2] См. Д у б б е л ь. Цит. соч., стр. 217.

(Герлицкий завод, Первый Брюннский и др.).[1] Парораспределение это изображено на фиг. 99.

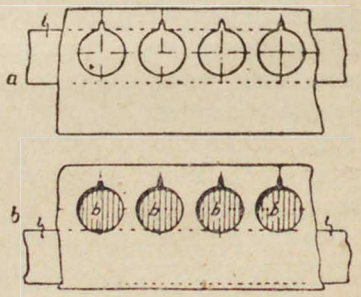
Оно отличается большой простотой. Для противодействия вредному влиянию падения клапана на седло здесь введен масляный катаракт, отдельно изображенный на фиг. 100.

С шпинделем клапана связан поршенек, заставляющий при опускании клапана переливаться масло из одной полости цилиндра, в которой имеется поршень, в другую. Это переливание совершается через ряд отверстий с уменьшающейся площадью прохода наверху. Поэтому при падении клапана гидравлические сопротивления проходу масла возрастают и дают возможность получить спокойную посадку клапана на седло. Число оборотов машины с «новым» парораспределением Кольмана доводилось до 150.



Фиг. 100

Хотя парораспределение Кольмана получило первоначально довольно большое распространение, но скоро на практике обнаружились его недостатки, главным образом ненадежная работа масля-



Фиг. 100а

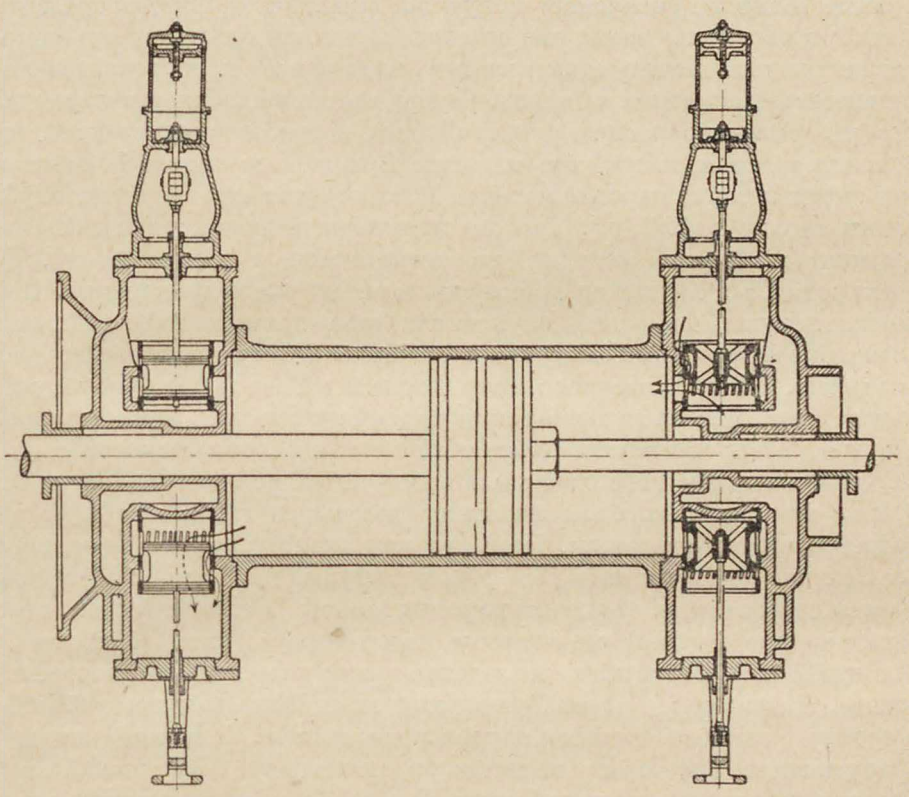
ного катаракта: скорость протекания масла должна была регулироваться от руки машинистом, а при неудачном регулировании происходили удары клапана о седло и расстройство парораспределения.

Поэтому многие из заводов, первоначально принявших парораспределение Кольмана, затем оставили его. Так сделал Герлицкий машиностроительный завод (рассылавший в 900-х годах циркуляры с указанием

[1] Одна из самых больших машин Парижской выставки 1900 г. — вертикальная машина завода Рингтофера в 1600 л. с. была снабжена в цилиндре высокого давления новым парораспределением Кольмана.

на недостатки машин с «новым» распределением Кольмана, побудившие завод вернуться к «старому» распределению Кольмана с принужденным падением клапана) и Первый Брюннский машиностроительный завод. [1]

Большой успех имело в начале 900-х годов новое парораспределение, предложенное заводом Ван ден Керхове в Генте и названное им «парораспределением с поршневыми золотниками» («piston-valves»).[2] В этом парораспределении внутренними парораспределительными органами являются поршеньки (т. е. поршневые золотники), внешние же распределительные



Фиг. 101

органы — такие, как у клапанных парораспределений со свободным падением клапана. Так как здесь не происходит удара клапана о седло, то можно допускать большое число оборотов. На фиг. 101 приведен разрез

[1] Сообщение в юбилейном издании «Erste Brünner Maschinen Fabrik-Gesellschaft», Leipzig, 1921 г., стр. 121.

[2] На немецком языке употребляют иногда не совсем правильный термин парораспределения «поршневыми клапанами» («Colbenventil-Steuerungen»). Проф. Г. С. Жирицкий совершенно верно характеризует их как «поршневые золотники» с механизмами клапанных распределений. Г. С. Жирицкий. Паровые машины, 5 изд., стр. 282, 1933.

цилиндра с таким парораспределением. Это парораспределение имело большой успех и стало исполняться несколькими заводами, кроме Ван ден Керхове, заводом б. Гартмана в Хемнице, на Эльзасском машиностроительном заводе, заводе «Яффа» в Голландии и др. Исследования профессора Мюнхенского политехнического института, М. Шретера,[1] подтвердили прекрасные качества машин с этим парораспределением и в отношении расхода пара и тепла, число оборотов свободно доводилось до 125—130 в минуту.

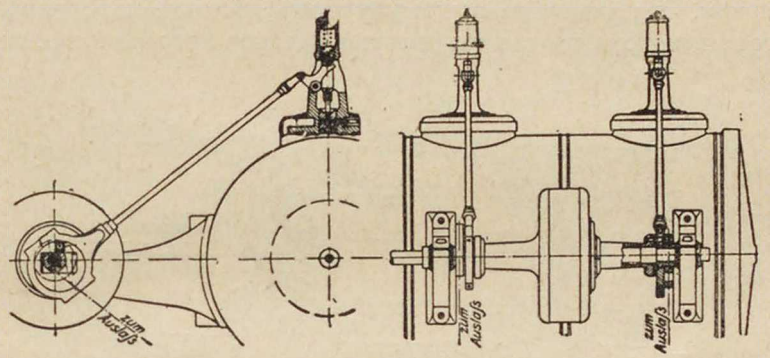
Еще большее значение получило клапанное парораспределение Лентца; в настоящее время оно осталось в тех или иных конструктивных видоизменениях почти единственным клапанным парораспределением, применяемым в паровых машинах. История возникновения и первоначального развития парораспределения Лентца подробно рассказана в мало распространенном юбилейном издании Брюннского завода [2] (этих сведений нет в истории паровой машины Матчосса, так как они были опубликованы только в 1921 г.). Там же помещены некоторые биографические сведения о Лентце, которые не встречаются в другом месте. Гуго Лентц родился в Капштадте и был сыном английского полковника. После окончания низшей школы он служил некоторое время юнгой на пароходе, делавшем рейсы между Гамбургом и Америкой и там научился слесарному мастерству. Позже он сделался актером и имел в Вене даже крупный успех. Но вследствие потери голоса он принужден был оставить эту деятельность и тогда решил посвятить себя технике. Он работал некоторое время в Брюнне на одном небольшом машиностроительном заводе, затем организовал там же небольшой машиностроительный завод для постройки изобретенного им двигателя. Но завод этот скоро закрылся из-за денежных затруднений и тогда (в 1894 г.) он поступил на Брюннский машиностроительный завод, в отделение паровых машин. Брюннский завод строил тогда паровые машины со «старым» парораспределением Кольмана (по патенту 1878 г.). Лентц тогда же задался целью упростить это парораспределение. На некоторое время Брюннский завод был отвлечен работой по постройке машин с «новым» парораспределением Кольмана, но после обнаруженных некоторых недостатков последнего, Брюннский завод занялся осуществлением идеи Лентца. В разработке первой машины с распределением Лентца и опытах с ней принимали участие и другие видные инженеры Брюннского завода. Затем начались хлопоты по получению патентов на отдельные части изобретения (взятые частью на имя Лентца, частью — на имя Брюннского завода), которые были закончены в 1898 г. Постройка крупных машин с распределением Лентца началась на Брюннском заводе в 1899 г., причем были построены 2 машины по 1000 сил (при 125 оборотах); одна из них была изготовлена для Парижской

[1] M. Schroeter und Koob. Untersuchung einer von van den Kerhove gebauten Tandem-Maschine von 250 P. S. Mitt. über Forschungsarbeiten, Heft 19, 1904.

[2] На это издание мы уже ссылались выше. История возникновения и раннего развития парораспределения Лентца изложена там на стр. 121—127.

выставки 1900 г. Эта машина [1] получила там высшую награду («Grand Prix»), а специально распределение Лентца золотую медаль. После этого парораспределение Лентца делает быстрые успехи в Германии (где было представлено на выставке в Дюссельдорфе), а затем и в других странах.

Распределение Лентца следует отнести тоже к классу клапанных парораспределений со связанным падением клапана. Самая передача от эксцентрика к клапану отличается крайней простотой: на клапане имеется ролик, а тяга от эксцентрика действует на качающийся кулачек, который подымает клапан, а затем сам опускается, позволяя пружине вызывать медленное опускание клапана, причем ролик остается все время в соприкосновении с кулачком (фиг. 102).



Фиг. 102

Главная трудность при создании этого парораспределения состояла в включении в эту простую систему действия регулятора. Эту задачу Лентц разрешил самым остроумным способом, а именно, сделав эксцентрик с переменным эксцентрицитетом и подчинив его действию плоского регулятора особой выработанной им конструкции, [2] находящегося на распределительном валике.

Этим мы заканчиваем наше изложение истории развития клапанных парораспределений и вернемся к ним только говоря о некоторых машинах, получивших значение в самое новейшее время.

Развитие золотниковых парораспределений и их теоретическое исследование

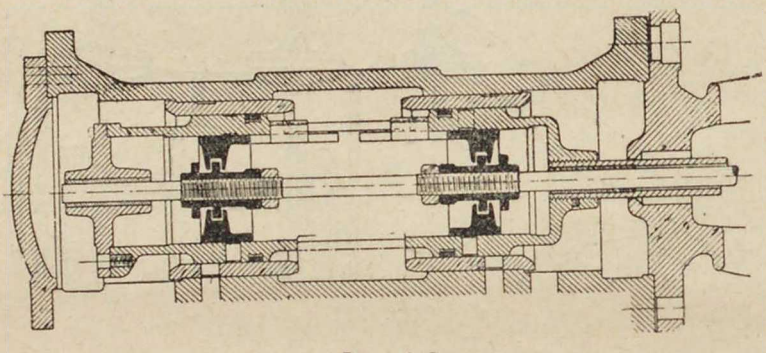
На ряду с созданными новыми типами парораспределений (крановых и клапанных), в течение всей второй половины XIX столетия продолжали развиваться золотниковые парораспределения, сохранившие и в дальнейшем значительные области применения: машины малой и средней мощности, вертикальные машины, быстроходные машины, паровозные

[1] Машина эта описана в цитированном описании паровых машин Парижской выставки 1900 г. Eude, стр. 39 и след.

[2] Об этом регуляторе (как и о плоских регуляторах для золотниковых машин) мы будем говорить позже.

и пароходные машины, локомобили и многие другие виды машин. Разнообразие предлагавшихся конструкций золотниковых парораспределений так велико, что мы можем остановиться только на главных типах.

Мы говорили уже о золотниках Фарко и Мейера, дававших возможность получать малое наполнение. Это стремление к получению малого наполнения повело позже к созданию специальных расширительных аппаратов, которые могли бы быть присоединены к машине с простым золотником и могли бы давать желаемое меньшее наполнение, притом переменное под действием регулятора. Такой аппарат, сконструированный американцем Трепером — был представлен на Филадельфийской выставке 1876 г. В Германию он был введен заводом Фосса (Voss) и известен под этим именем. Эти аппараты могли улучшить действие парораспределения простым золотником, но давали большое вредное пространство, они имеют



Фиг. 103

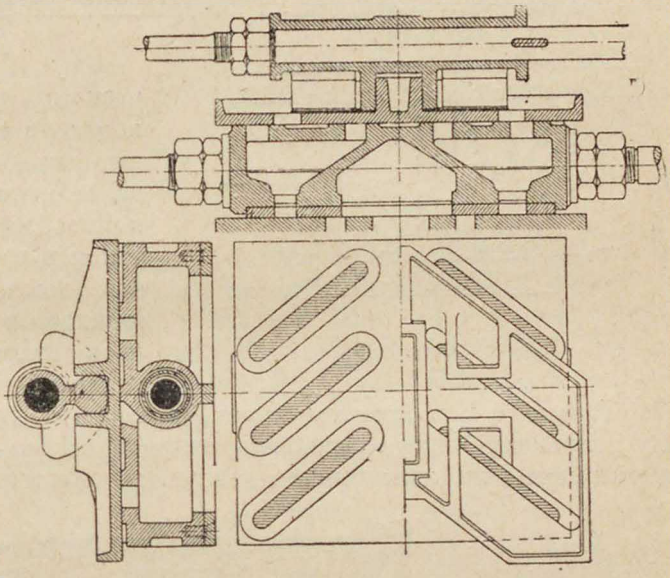
также и другие недостатки [1] и потому не получили особенно большого значения.

Гораздо большее значение получили двойные золотники усовершенствованных конструкций. Первую группу таких конструкций составляют парораспределения, представляющие изменения парораспределения Фарко. Это последнее парораспределение допускало, как мы видели, изменение степени наполнения посредством действия регулятора. При этом к достоинству этого парораспределения принадлежит еще то обстоятельство,что воздействие регулятора требуется только для поворота упорной пластинки и не требует преодоления большого сопротивления со стороны распределительных органов. Но недостатком парораспределения Фарко является невозможность получать степени наполнения большие 0,4 (так как удар верхней пластинки о задержку может последовать только при движении нижнего золотника вперед). Поэтому появился ряд парораспределений, сохраняющих основную идею распределения Фарко, т. е. движение пластинки, помещенной на нижнем золотнике вместе с последним (по-немецки такие распределения называются «Schleppschieber-Steuerungen», по-русски предлагался термин «буксирные

[1] Г. Хедер. Паровые машины, М., стр. 353, 1902.

распределения»),[1] но дающих возможность получать большие степени наполнения. Из этих парораспределений наибольшее значение получило парораспределение, предложенное в 1871 г. австрийским инженером Гурауэром (Guhrauer). Это парораспределение представляет собой искусное соединение идей распределений Фарко и Мейера. Оно изображено на фиг. 103.

В нем тоже имеется нижний распределительный и верхний расширительный золотники, как и в распределении Мейера; перемещение верхнего золотника производится вторым эксцентриком и золотниковым штоком, имеющим форму винта сравнительно большого диаметра (с правой и левой нарезкой). Винт этот ходит в гайках верхнего золотника с большими зазорами, что облегчает воздействие регулятора, как это имеет место и в распределении Фарко.



Фиг. 104

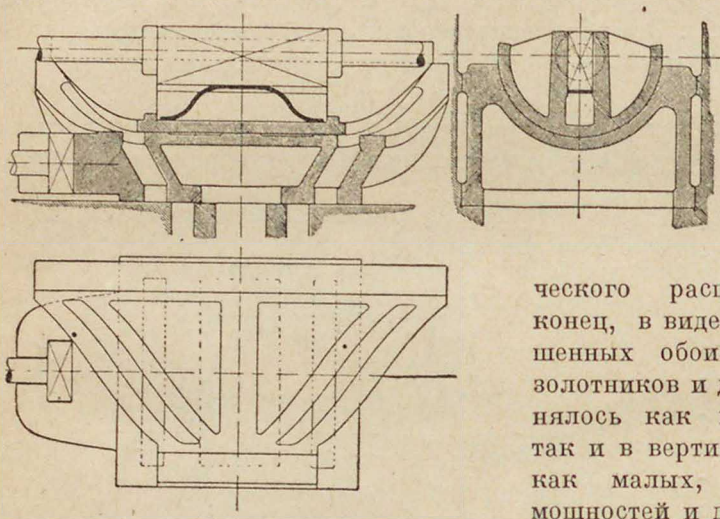
Изменение степени наполнения достигается (в отличие от распределения Мейера) при небольшом повороте винта. Зазоры между винтом и гайками облегчают действие регулятора (как и в распределении Фарко). Однако, именно перемещение верхнего золотника вместе с нижним и удерживание его на последнем только помощью силы тяжести и трения, а также удары при соприкосновении гаек с винтом, делали возможным применение этого парораспределения только для горизонтальных машин с небольшим числом оборотов. В этой области распределение Гурауэра долго держалось и оно упоминается даже в новейших учебниках. [2]

Гораздо большее значение получало другое видоизменение распределения Мейера, известное под названием золотника Ридера (Rider). Оно было предложено американским инженером А. К. Ридером в 1870 г. и на него был взят патент (28 мая 1870 г.); однако совершенно такое же распределение предлагалось еще в 1844 г. швейцарским инженером Бодмером (Bodmer), который взял на него английский патент в указанном году

[1] Хедер. Цит. соч., т. II, стр. 352.

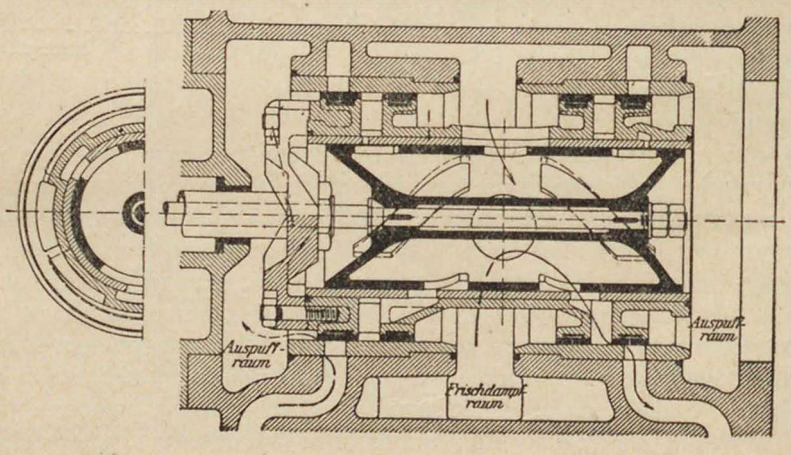
[2] Г. С. Жирицкий. Паровые машины. Энергоиздат, 1933 г., стр. 184.

(№ 10 243). Широким кругам это парораспределение сделалось известным после Венской выставки 1873 г. Распределение Ридера исполнялось в самых разнообразных формах: в виде плоских золотников (основного и распределительного), в виде плоского основного и полуцилиндрического расширительного; наконец, в виде вполне уравновешенных обоих цилиндрических золотников и других. Оно применялось как в горизонтальных, так и в вертикальных машинах, как малых, так и больших мощностей и долгое время являлось самым совершенным из золотниковых парораспределений.



Фиг. 105

Только с применением высокоперегретого пара в конце 90-х годов золотники Ридера сделались неподходящими (хотя и делались попытки изменения конструкции для работы при этих условиях). [1]



Фиг. 106

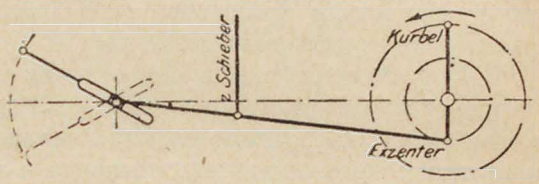
На фиг. 104 изображен плоский золотник Ридера. Каналы нижнего золотника наклонены относительно оси. Изменение наполнения достигается

[1] Так называемое двухкамерное распределение Дёрфеля.

перемещением верхнего золотника по направлению, перпендикулярному к его рабочему движению. На фиг. 105 изображен полуцилиндрический золотник Ридера.

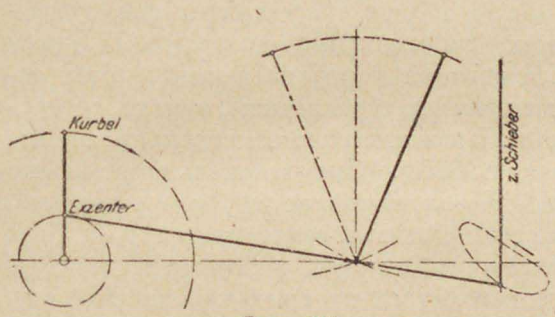
На фиг. 106 изображено распределение Ридера с обоими цилиндрическими золотниками.

На ряду с двойными золотниками для изменения степени наполнения применялись также и распределения с одним золотником, но с переменным наполнением. Для этой цели применялись распределения кулисного типа, находящиеся под действием регулятора.



Фиг. 107

Эти распределения находились в связи с новыми типами кулисс, преимущественно пароходных, появившихся в этом периоде. В этих кулиссах, в отличие от кулисс Стефенсона и т. п., применяется только один эксцентрик; конец или какая либо другая точка эксцентриковой тяги двигателя в кулиссе, которая может поворачиваться и ставиться в том или ином направлении, в зависимости от чего изменяется характер движения золотника и машина получает передний или задний ход. Такие кулиссы по-немецки называются «Lenkersteuerungen» (т. е. распределения с направляющим приспособлением); [1] они составляют обширный класс парораспределений, применяемых преимущественно, как мы говорили, в пароходных машинах.



Фиг. 108

Первой кулиссой этого типа была кулисса английского инженера Гакворта (Hackworth), предложенная в 1859 г. Схема кулиссы Гакворта изображена на фиг. 107.

При увеличении применяемых давлений свежего пара в золотниковой коробке увеличился износ поверхностей в направляющем аппарате и пришлось часто заменять направляющую кулиссу — приближенным движением по дуге круга. Примером такого распределения является привод Клуга (предложенный в 1876 г.), изображенный на фиг. 108.

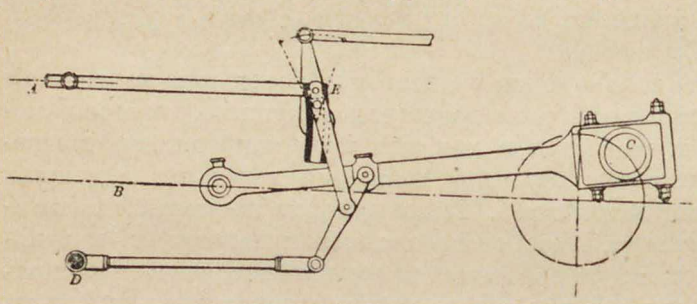
В отличие от привода Гакворта, здесь золотниковая тяга идет от конца эксцентриковой тяги. Очень схож с приводом Клуга привод Маршаля (Marschall), на который взят был патент в 1879 г. К этому же классу принадлежит кулисса Джоя (Joy), нашедшая применение

[1] Проф. Ф. А. Брикс называет этот тип парораспределения «золотниковым приводом» (Ф. А. Брикс. Золотниковое парораспределение, Л. 1928).

сначала в паровозах, но затем применявшаяся также часто в пароходных машинах. Схема кулиссы Джоя представлена на фиг. 109.

Применение кулиссных распределений к стационарным машинам встречало, однако, затруднения вследствие слишком большой сложности получающихся конструкций. Гораздо большее значение приобрели в практике стационарных паровых машин пароораспределения с одним эксцентриком, управляемым плоским регулятором. Эти конструкции (приобревшие сначала особенное значение в Соединенных Штатах) получили распространение позже в виде быстроходных паровых машин и будут нами рассмотрены дальше.

К рассматриваемой эпохе относятся также первые крупные теоретические исследования золотниковых пароораспределений. Долгое время налаживание пароораспределения являлось результатом чистого искусства и практического опыта конструктора и мастера. Аналитические исследования золотниковых пароораспределений, делавшиеся уже давно, приводили к запутанным формулам, не находившим практического применения. Ясность в этот вопрос внесло только применение графических приемов, так называемых, золотниковых диаграмм. Первыми графическими приемами для исследования пароораспределений были эллиптические и синусоидальные диаграммы, требовавшие, однако, построения по точкам кривых. Гораздо большее значение приобрела диаграмма Цейнера (G. Zeuner), предложенная в 1858 г. [1] Она оказалась чрезвычайно удобной для исследования простых золотниковых пароораспределений, а также и для более сложных случаев двойных золотников и кулиссных распределений. Поэтому изложение свойств этой диаграммы сделалось необходимой и важной частью всякого курса паровых машин. Это изучение часто отодвигало на второй план изложение термодинамических свойств паровой машины и придавало преподаванию этого предмета чрезмерно формальный характер. [2]



Фиг. 109

Наряду с диаграммой Цейнера, но несколько позже ее, предложена была другая диаграмма — Мюллера (Müller). Последний опубликовал

[1] В первом издании своей книги о пароораспределениях (G. Zeuner. Die Schiebersteuerungen) 1858 г. Книга эта выдержала большое количество изданий и получила распространение во всех странах.

[2] Это замечание относительно немецких высших технических школ, имеющееся у Матчосса (т. II, стр. 106) в полной мере применимо и к русским (Петербургский и Харьковский технологический институты) периода 80-х годов прошлого столетия.

свою работу в 1861 г. Диаграмма Мюллера получила распространение в Германии только в 80-х годах прошлого столетия. По точности она не превосходит диаграммы Цейнера, но несколько проще ее. В немецких и русских курсах [1] обе эти диаграммы излагаются параллельно. В Англии, Франции и Соединенных Штатах применяется почти исключительно диаграмма Цейнера.

В более развитой теории пароораспределений большую роль играет исправление простых золотниковых диаграмм (Цейнера или Мюллера) принятием во внимание конечности длины шатуна. Из разных приемов исправления диаграмм Цейнера и Мюллера особенное значение получила предложенная профессором Военно-Морской Академии в Петербурге, Ф. А. Бриксом, так называемая «бицентровая диаграмма». [2] Она принята и во многих иностранных курсах. Теория кулисс излагается обыкновенно по смешанному графически-аналитическому методу, [3] но есть и чисто графические методы исследования кулиссных пароораспределений. [4]

В настоящей главе мы рассмотрели эволюцию пароораспределений, захватив в своем обзоре большой период (от 1850 г. до 1900 г.), чтобы дать полную картину развития паровых машин в этом отношении. Мы видели, что у наиболее талантливых деятелей в этой области (Корлисса, Броуна, Зульцера) предлагавшиеся ими конструкции связывались с улучшениями в использовании тепла в их машинах. Но у позднейших изобретателей внимание часто обращалось только на отыскание новых систем распределения, часто даже нисколько не лучших, чем прежние.

Теперь нам предстоит рассмотреть именно эти более глубокие изменения в паровых машинах, внесенные в них во второй половине XIX столетия. Изменения эти связаны были в значительной степени с теоретическим исследованием тепловых процессов, в них происходящих. Это исследование предполагало в свою очередь выяснение общей связи между тепловыми и механическими явлениями, т. е. создание термодинамики. К рассмотрению этих вопросов мы перейдем в следующей главе.

---

[1] H. Dubbel. Steuerungen der Dampfmaschinen. Berlin, 1911.

Г. С. Жирицкий. Паровые машины и др.

[2] Ф. А. Брикс. Морской сборник, № 5, 1893 г. и Zeitschr. des VDI, 1894. Новейшие исследования проф. Ф. А. Брикса относительно этой диаграммы напечатаны в журнале «Schiffbau», № 17, 1925 г. и в книге «Золотниковое распределение», Л., 1928.

[3] Примером такого рассмотрения теории кулисс являются изложения ее в современных курсах, например у Е. Г. Кестнера «Динамика и распределение паровозов». Москва, 1931, Н. И. Карташева «Паровозные пароораспределительные механизмы». Петербург, 1914.

[4] Такое изложение имеется, например, в книге Грассмана. Grassman. Geometrie und Massenbestimmung der Kulissen-Steuerungen», Berlin, 1927.

Глава II

СОЗДАНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПАРОВОЙ МАШИНЫ

Теория тепла и прикладная механика в первой трети XIX века

Мы говорили уже в гл. IV второго периода о воззрениях на теплоту в XVII и XVIII веках. Во второй половине XVIII века и в начале XIX века преобладание получила материальная теория тепла, хорошо объяснявшая некоторые тепловые явления, например, нахождение температуры смеси двух нагретых тел по температурам, весам и теплоемкости составных частей смеси (правило Рихмана) [1] и т. п. Этот взгляд на природу тепла был очень ярко сформулирован французским ученым Фурье (Fourier) в предисловии к его знаменитому сочинению «Аналитическая теория тепла», [2] которое имеет, впрочем, гораздо большее значение в истории развития математики, чем физики: «Каково бы ни было развитие механических теорий, они неприменимы к явлениям тепла. Последние образовывают специальный класс явлений, которые не могут быть объяснены законами движения и равновесия».[3]

Между тем к этому времени в самой физике накопился ряд фактов, указывающих на связь между тепловыми и механическими явлениями, например, опыты Румфорда и Деви над появлением теплоты при трении. Но гораздо более важным фактором являлась необходимость уяснения связи между затраченной теплотой и получаемой работой в паровой машине, громадное экономическое значение которой в начале XIX столетия уже вполне уяснилось.

Чрезвычайный рост крупной промышленности в конце XVIII и начале XIX века вызвал выделение прикладной механики в самостоятельную дисциплину. В дисциплине этой, разрабатываемой такими крупными учеными, как Навье (Navier), Кориолис (Coriolis) и Понселе (Poncelet), приведены были в систему все многочисленные разрозненные исследования прикладного характера, сделанные в XVII и XVIII веках и

---

[1] Русский академик, погибший во время опытов с атмосферным электричеством.

[2] Fourier. Théorie analytique de la chaleur, Paris, 1822.

[3] Фурье. Цит. соч., стр. XVI. Впрочем, надо сказать, что в первой трети XIX века были и представители кинетического воззрения на теплоту, например, Ампер, Френель и др.

произведен был ряд самостоятельных работ по важнейшим вопросам техники. Для интересующего нас вопроса о связи между тепловыми и механическими явлениями созданная прикладная механика дала важнейшее механическое понятие, а именно, механической работы, точно определяемой, как произведение из величины силы на пройденный путь (при совпадении направления этих величин). При всем развитии теоретической механики в XVIII и начале XIX вв. точного определения понятия механической работы в ней не было, хотя необходимость чувствовалась, и аналогичные произведения фигурировали под разными названиями. Так, например, Лагранж в своей аналитической механике, в формулировке начала возможных перемещений, произведение из силы на бесконечно малое перемещение (по направлению силы) называет «моментом силы», хотя слово «момент силы» имеет в механике и совершенно другие значения. [1] В настоящее время [2] в формулировке начала возможных перемещений указанное произведение называют работой силы, что является, конечно, несравненно более ясным и естественным.

Но особенное значение введение понятия работы имело для формулировки закона живых сил. Закон этот является частным случаем общего закона сохранения энергии и в настоящее время он формулируется в общем виде, с применением понятия работы: «приобретенная системой на протяжении известного пути живая сила равна сумме работ всех внешних и внутренних сил, действующих на систему».

У Лагранжа этот закон дается для частного случая сил, имеющих потенциал, в виде закона сохранения живых сил, в котором работа сил не фигурирует, а вводится потенциальная функция, физическое значение которой не определяется. [3]

Силы, рассматриваемые в прикладной механике, по большей части не имеют потенциала. Поэтому формулировка значения живых сил в том виде, как она дана у Лагранжа, не дает возможности сделать те выводы, которые необходимы, как основание прикладной механики: уравнение движения машины, являющееся основой теории махового колеса и ряд других важных выводов прикладной механики. Поэтому введение понятия механической работы являлось совершенно необходимым шагом для развития прикладной механики. С другой стороны, это понятие являлось настолько естественным и было настолько подготовлено всей научной и производственной обстановкой, что трудно даже точно определить автора, впервые ясно формулирующего это понятие. История возникновения этого понятия рассказана подробно у Кориолиса [4] и из нее видно, что никто из вышеуказанных трех основателей прикладной механики не мог обосновать своего специального права на определение и введение этого

[1] Lagrange. Mécanique analytique, т. I, стр. 29.

[2] В. Л. Кирпичев. Беседы о механике, стр. 8. В. Л. Кирпичев. Цит. соч., стр. 251.

[3] Lagrange. Цит. соч., стр. 307.

[4] Coriolis. Traité de la mécanique das coups solides et du calcul de l'effet des machines, 2-me édition, стр. IX, Paris, 1844.

термина. По поводу термина «работа», который он применяет в своей книге, он говорит, что применение его так естественно, что он встречался (без особенно точного определения) у Навье (в примечаниях к его изданию книги Белидора) и у Прони. К этим авторам надо было бы также прибавить Понселе, с именем которого чаще всего связывают введение понятия «механической работы. [1]

Заметим между прочим, что формулировка закона живых сил в том виде, как это было сделано в прикладной механике, потребовала изменения определения понятия «живой силы», именно, введения в выражение Σmv^2 множителя $\frac{1}{2}$ (что сделано впервые Кориолисом). [2]

Для измерения работы предлагались разные единицы. Первоначально за единицу работы предлагалась величина, соответствующая подъему груза в 1000 кг на высоту 1 м. Эту единицу применяют, например, в своих сочинениях Кориолис [3] и С. Карно.[4]

Создание понятия механической работы являлось, конечно, первым совершенно необходимым звеном для создания термодинамики, так как иначе невозможно было бы никакое точное количественное установление соотношений между механическими и тепловыми явлениями; единица тепла — калория — была установлена уже давно, хотя и без той точности, которая принята в современных определениях калории. Как мы говорили, установление понятия механической работы было сделано в 20-х годах прошлого столетия, но прошло еще много времени, прежде чем вопрос об эквивалентности работы и теплоты был поставлен в науке. Первоначально сделаны были попытки найти не основные соотношения между теплотой и механической работой, а исследовать общие условия работы тепловых двигателей. Это было сделано в сочинении Сади Карно, появившемся в 1824 г. [5] В начале этого сочинения автор указывает на то значение, которое приобрели паровые машины в современной промышленности, а затем останавливается на состоянии современной ему теории паровых машин, которое он считает очень низким, так как она не может дать ответа

---

[1] Так, например, Планк говорит: «термин работа дан Понселе» и ссылается на его «Cours de méchanique appliquée aux machines», Metz, 1826.

M. P l a n k. Das Princip der Erhaltung der Energie, 2-Aufl, стр. 12, Leipzig, 1908.

[2] В первом издании цитированной книги, 1829 г.

[3] Кориолис предлагал назвать эту единицу «динамодой». См. цит. соч., стр. IX.

[4] С. К а р н о. Размышления о движущей природе огня. Это сочинение будет в дальнейшем цитироваться по переводу, помещенному в сборнике «Второе начало термодинамики». ГТТИ, 1934. Определение единицы работы (как Карно ее называет: «движущей силы») дано на стр. 46 этого издания; (движущая) сила здесь выражена в кубических метрах воды, поднятой на высоту одного метра.

[5] Сочинение Сади Карно (S a d i C a r n o t. Réflexions sur la force motrice du feu, Paris 1824) переведено на русский язык и напечатано в вышеупомянутом сборнике «Второе начало термодинамики». Краткие биографические сведения и разбор этого произведения приведен в статье А. А. Радцига «С. Карно и его размышления о движущей силе огня». Архив истории науки и техники, № 3, 1934.

на самые основные вопросы, а именно: конечна или бесконечна движущая сила тепла (т. е., говоря современным языком, конечно или бесконечно количество работы, получаемое при затрате определенного количества тепла), существует ли определенная граница для возможных улучшений, является ли водяной пар наивыгоднейшим рабочим телом в тепловых двигателях. При рассмотрении этих общих вопросов Карно исходил из представлений материальной теории тепла, хотя некоторые сомнения в ее правильности у него проявляются уже и в напечатанном сочинении. [1] В бумагах же Карно, оставшихся после его смерти (1832 г.) и напечатанных его братом только в 1878 г. заключаются утверждения о кинетической природе тепловых явлений и даже дается приближенное значение механического эквивалента тепла.

Так как по основному представлению материальной теории тепла оно является неуничтожаемой невесомой материей, то, по представлению Карно, процесс получения работы является необходимо связанным с переходом тепла от тела с более высокой температурой к телу с меньшей температурой; при этом получается полная аналогия с водяными двигателями: вес падающей воды также не меняется при совершении работы, а вода только переходит от места с большей высотой к месту с меньшей высотой. Эту мысль Карно[1] выражает так: «возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода («le calorique»), а его переходу от горячего тела к холодному, т. е. восстановлению его равновесия, — равновесия, которое было нарушено некоторой причиной, будь то химическое действие, как горение или что-нибудь иное».

«Согласно этому принципу недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезна».[2]

«Повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение движущей силы». [3]

Мы видим, что материальная теория тепла, которой придерживался Карно, приводит его к представлению, в основном неправильному, о сохранении количества тепла, заимствованного у более нагретого тела при переходе его к менее нагретому с совершением работы.

Но зато установление необходимости для получения работы существования разности температур явилось впоследствии одним из оснований второго закона термодинамики. Карно не ограничивается этим утверждением, но устанавливает и анализирует ряд понятий, являющихся и в настоящее время основными в термодинамике: понятие кругового процесса,

---

[1] Так он делает относительно теплоты следующее замечание: «заметим мимоходом, что основные положения, на которые опирается теория тепла, требуют внимательного исследования. Некоторые данные опыта представляются необъяснимыми при современном состоянии теории» (стр. 29).

[2] С. Карно. Цит. соч., стр. 20.

[3] Там же, стр. 22.

условий его обратимости, понятие идеального процесса тепловых двигателей (так называемого «цикла Карно»).

Создав эти понятия, Карно доказывает независимость степени использования тепла в идеальном процессе от особенностей рабочего тепла. Это доказательство ведется при помощи в высшей степени замечательного рассуждения о невозможности построения perpetuum mobile, [1] причем делается примечание, опять-таки показывающее, что Карно понимал связь между теплотой и движением. Он говорит именно следующее: «могут здесь спросить: если доказана невозможность perpetuum mobile для чисто механических действий, то имеет ли это место при употреблении тепла или электричества; но разве возможно для явлений тепла и электричества придумать иную причину, кроме какого-либо движения тел и разве эти движения не должны подчиняться законам механики». [2]

Все вышесказанное ясно доказывает, что в сочинениях С. Карно впервые даны основы общей теории тепловых двигателей, частным случаем которых является паровая машина. Это тем более замечательно, что ко времени написания книги Карно, кроме паровой машины практически не было других тепловых двигателей: правда, в Англии в 1816 г. был предложен двигатель Стирлинга, работающий нагретым воздухом, но он какого-либо распространения не получил и не был известен Карно. [3] Но в сочинении Карно заключается также много конкретного материала, касающегося паровых машин: в нем приводятся данные относительно потребления топлива в паровых установках, он доказывает выгодность применения высоких давлений, расширения пара, применения машин многократного расширения. [4] Таким образом, сочинение Карно могло бы оказать большое влияние на развитие теории паровых машин. Однако, оно осталось в эпоху своего появления совершенно неизвестным и даже изложение идей Карно Клапейроном (Clapeyron), сделанное в 1834 г., [5] осталось также незамеченным. Только впоследствии В. Томсон и Р. Клаузиус выяснили все значение небольшой по размерам работы С. Карно.

Создание термодинамики: предшественники

Прежде чем могли быть точно разрешены вопросы, касающиеся тепловых двигателей, затронутые в книге Карно, должен был быть разрешен общий вопрос о связи между тепловыми и механическими явлениями. Решение

---

[1] С. Карно. Цит. соч., стр. 24.

[2] С. Карно. Цит. соч., стр. 24.

[3] Он говорит об этой попытке в следующих выражениях: «говорят, недавно в Англии были сделаны удачные попытки развить движущую силу воздействия тепла на атмосферный воздух. Мы совершенно не знаем, в чем заключались эти попытки и были ли они произведены на самом деле».

[4] Его указание на двигатель внутреннего сгорания Ньепса и собственные предложения устройства таких двигателей, предвосхищающих идею дизельмотора, будут разобраны нами позже.

[5] Clapeyron. Journal de l'École Polytechnique, 1834.

этого вопроса повлекло за собой изменение всего физического мировоззрения: все явления физики стали рассматриваться как имеющие единую механическую основу. В самых разнообразных явлениях эта основа сохраняется и принимает только различные формы. Таким образом был сделан подход к общему закону сохранения энергии. Естественно, что столь широкое обобщение могло возникнуть только на подготовленной почве, к нему приводил целый ряд проблем физики, нуждавшихся в объединении и объяснении. Среди этих проблем решающую роль сыграли именно явления тепла: именно в этой области решение настоятельно вынуждалось практическими потребностями.

Идея о невозможности получения работы из ничего, принятая за аксиому относительно механических явлений в XVIII веке, [1] применена была совершенно сознательно, как мы видели, С. Карно к тепловым явлениям. Но в других областях физики высказывалась эта же идея. Так, например, основываясь на этом же принципе невозможности создания perpetuum mobile Фарадей (M. Faraday) основывал свои возражения против контактной теории электричества. Он писал следующее: «контактная теория принимает, что сила, которая в состоянии преодолевать значительные сопротивления может возникнуть из ничего. Это означало бы создание силы, которое нигде не происходит в других областях без соответствующих затрат чего-то, служащего ей питанием. Если бы контактная теория была справедлива, то это привело бы к отрицанию равенства между причиной и действием. Тогда было бы возможно и perpetuum mobile и легко было бы получать непрерывные механические действия за счет электрического тока, производимого соприкосновением». [2]

Та же мысль о невозможности получения теплоты без затраты чего-либо другого лежит в основе термохимического закона Гесса (Hess) о том, что при образовании какого-либо соединения количество выделенной теплоты остается одним и тем же, происходит ли это соединение сразу или каким-либо более сложным путем. [3]

Насколько ко времени конца 30-х и начала 40-х годов наука подошла близко к воззрению о единстве физических явлений показывает следующее утверждение Мора (Mohr): [4] «кроме известных 54 элементов в природе вещей есть только один агент, называемый силой; он может являться, смотря по обстоятельствам, в виде движения, химического сродства, притяжения, электричества, света, теплоты и магнетизма и из каждого из этих явлений могут быть произведены все прочие. Одна и та же сила, которая подымает молот, может произвести каждое из прочих явлений».

---

[1] Легшая в основание известного постановления 1775 г. Парижской Академии наук о пересмотре или изобретении, предлагающих perpetuum mobile. Histoire de l'Académie des Sciences, стр. 61—62, 1775.

[2] M. Faraday. Philos. Transactions, стр. 93, London, 1840.

[3] Hess. Thermochemische Untersuchungen. Poggendorff's Annalen, t. 50, стр. 392, 1840.

[4] Цитирую по книге Планка: M. Planck. Das Princip der Erhaltung der Energie. 2-Aufl. Leipzig, стр. 24, 1908.

В очень ясной форме та же идея о тождестве теплоты и механической работы высказана была также французским инженером Сегеном (Séguin)[1] в таких словах: «между теплотой и движением должно существовать тождество по их природе, так что эти два явления представляют, только под различной формой, проявления одной и той же причины. Эти идеи сообщены мне были давно еще моим дядей Монголфье».

Наконец, мы говорили уже, что у С. Карно, в оставшихся ненапечатанными в свое время заметках, идея о взаимной превращаемости теплоты и механической энергии высказана с полной ясностью и дана приблизительная величина механического эквивалента тепла.

Открытие закона сохранения энергии

Оставалось сделать решительный шаг в этом направлении. Он был сделан почти одновременно несколькими учеными. Первой по времени напечатания (1842 г.) была работа Гейльброннского врача, Юлиуса Роберта Майера (Julius Robert Mayer). Но почти одновременно с работой Майера (а именно в 1843 г.) стали появляться работы англичанина Джоуля (Joule) и датского ученого Кольдинга (Colding). Эти последние работы носили первоначально частный характер и касались специально тепловых явлений, но очень быстро затронут был общий вопрос о связи вообще между всеми физическими явлениями, что повело к формулировке общего закона сохранения энергии.

В общем виде закон этот был сформулирован Гельмгольтцем в 1847 г. В виду чрезвычайной важности закона сохранения энергии и близости работ этих ученых по времени появления (а иногда и по ходу мысли), между ними, а также между сторонниками каждого из них, возник чрезвычайно острый спор о первенстве, в котором большую роль играли и национальные пристрастия и личные отношения и сочувствие тем или иным научным методам (выводам более или менее абстрактного характера, экспериментальному изучению вопроса, математическому обоснованию выводов).

Мы не можем останавливаться на подробностях этого спора, который сам по себе, с нашей точки зрения, и не имеет чрезмерно большого значения (так же, как и споры об изобретателе той или иной машины). Закон сохранения энергии явился результатом длинной научной эволюции, некоторые моменты которой были указаны в предыдущем отделе. В настоящее время является более или менее общепризнанной научная самостоятельность названных ученых и ценность тех различных путей, по которым они шли в своих выводах и тех результатов, к которым они пришли. Мы коснемся только самых главных работ и притом только трех ученых: Роберта Майера, Джоуля и Гельмгольтца. Даже простое перечисление работ этих ученых было бы здесь невозможно и можно отослать к специальным сочинениям по этому вопросу: по истории открытия закона сохранения энергии

[1] S e g u i n ainé. Etude sur l'influence des chemins de fer. Paris, стр. 378, 1839.

подробное исследование имеется у Планка [1] и у Маха. [2] Очень подробная библиография по вопросам теплоты и термодинамики до 1870 г. имеется у Верде [3] (Verdet). Сочинения Майера были изданы впоследствии [4] Вейраухом (Weyrauch). Работы Джоуля изданы в собрании его сочинений.[5] Наконец, работа Гельмгольтца издана в серии «Классиков естествознания» Оствальда [6] и переведена на русский под редакцией академика П. П. Лазарева. [7]

Из работ Майера особенное значение представляют работы 1842 г.: «Замечания о силах неживой природы»[8] и 1845 г. «Органическое движение в его связи с обменом веществ». [9]

Первая работа невелика по объему, но уже содержит ряд совершенно определенных указаний на связь между теплотой и работой. Майер исходит из общего положения, характеризуемого изречением: причина равна своему действию («causa equat effectum») и применяет его к понятию механической силы. Этим термином он обозначает, однако, не силу в том смысле, как это применяется теперь в механике, а то, что сейчас обозначается энергией. Так как имеется много случаев видимого уничтожения движения (а следовательно и механической энергии), например, вследствие действия трения, то согласно вышеуказанному общему положению, должна быть какая-то замена исчезнувшему движению. Этим заменяющим движение явлением бывает во многих случаях теплота; она появляется, например, при затрате работы на преодоление трения. Из этой мысли Майера легко было сделать вывод о существовании постоянного числового

---

[1] M. Planck. Цит. соч.

[2] E. Mach. Principien der Wärmelehre, Leipzig, 1896 г.

[3] Verdet. Théorie mécanique de la chaleur, Oeuvres, t. VII et VIII. Paris, 1870.

[4] Издания, сделанные самим Майером в 1867 г., заключают не все его статьи. Издание Вейрауха гораздо более полно и заключает большую биографию Роберта Майера. Это издание сделано в двух книгах: R. Mayer. Die Mechanik der Wärme. Stuttgart, 1893 и «Kleinere Schriften und Briefe von Robert Mayer». Stuttgart, 1893.

Главные работы Майера изданы на русском языке под названием Роберт Майер. «Закон сохранения и превращения энергии». ГТТИ, 1933.

В издании этом тоже помещена биография Майера; к ней сделаны введение и примечания, выясняющие значение работы Майера и отношение ее к работам его современников. Кроме того, текст некоторых из работ Майера приведен в первоначальной редакции Майера, отличающейся от позднейших изданий самого Майера и Вейрауха. Таким образом издание это представляет самостоятельный интерес.

[5] Scientific papers by J. C. Joule (2 тома, Лондон, 1884—1887 гг.).

[6] Ostwald's Klassiker der exacten Wissenschaften. № 1. H. v. Helmholtz. Über die Erhaltung der Kraft. Эта работа перепечатана также в собрании научных работ Гельмгольтца: H. v. Helmholtz. Wissenschaftliche Abhandlungen, t. I.

[7] Классики естествознания. Г. Гельмгольтц. О сохранении силы.

[8] R. Mayer. Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. Annal. der Chemie und Pharmacie, 1842.

[9] R. Mayer. Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel. Heilbronn, 1845.

соотношения между величиной исчезнувшего движения (измеряемого затраченной работой) и количеством возникающего тепла, т. е. установить понятие механического эквивалента тепла. Майер действительно в заключении своего мемуара говорит: «для решения уравнений, имеющих место между силой падения и движением с одной стороны и теплом — с другой, необходимо ответить на вопрос, как велико соответствующее определенному количеству силы падения или движения количество тепла. Например, мы должны были бы определить, как высоко должен быть поднят определенный груз над поверхностью земли, чтобы его сила падения была эквивалентна («äquivalent») нагреванию равного ему по весу количества воды от 0 до 1°».

Мы видим, что в этих словах сделан необходимый шаг в формулировке основного закона термодинамики. Майер делает дальше первую попытку определения величины этого механического эквивалента тепла. Для этого он пользуется известной из опытов над газами величиной отношения теплоемкостей при постоянном объеме и при постоянном давлении, которое он принимает равным 1,421 (вместо теперь применяемого числа — 1,405). Приняв это число, он находит для механического эквивалента тепла значение, равное около 365 кгм (вместо теперь применяемого числа 427 кгм).[1] В заключение своей статьи он делает крайне важное замечание о малом значении полезного действия паровых машин того времени; к этому вопросу он не раз возвращается и в дальнейших своих трудах.

В работе 1845 г. идеи, высказанные в первой работе, развиваются и уточняются. В ней приведен в подробностях способ нахождения величины механического эквивалента тепла по разности между теплоемкостями воздуха при постоянном давлении и при постоянном объеме (причем получается число 367 кг).[2] Далее здесь приведен также подробный расчет величины полезного действия паровых машин.[3] Теплотворную способность углерода Майер принимает равной 8558 кал., механический эквивалент тепла равным 425 кг. Тогда максимальная работа, которая соответствует теплоте, получаемой при сжигании 1 кг угля, будет равна $425 \cdot 8558 = 3\,636\,150$ кг/м (Майер принимает округленно 3 600 000 кг/м). Лучшие машины его времени дают работу, по его словам, равную подъему одной весовой единицы на полмиллиона парижских футов при сжигании такой же весовой единицы угля. Это будет приблизительно 162 500 кг/м на 1 кг сожженного угля (принимая 1 парижский фут приблизительно равным 0,325 м).

Таким образом, коэффициент полезного действия получается равным:

$$\frac{162\,500 \cdot 100}{3\,600\,000} = 4{,}5\%.$$

[1] Деталей своего расчета Майер не сообщает; разница между найденным им числом и современным значением механического эквивалента тепла объясняется неточностью применяемых им данных о газах.

[2] Русск. пер., стр. 104—105.

[3] Там же, стр. 106—107.

Майер говорит от 5 до 6% (в паровозах же того времени, как он правильно указывает, этот коэффициент снижался до величины меньшей — 1%).[1]

В дальнейшем содержании этой работы Майер много говорит о превращении форм энергии друг в друга, причем различает 5 существенно различных форм: тяжесть, движение, теплоту, электричество (и магнетизм) и химическое различие веществ. Эти формы преобразуются одна в другую с сохранением общего количества энергии (вместо слова «энергия» Майер везде употребляет слово «сила», но это делали и другие авторы, например, Гельмгольтц; хотя слово «энергия» было предложено еще в начале XIX столетия Т. Юнгом (Th. Young), [2] но вошло в употребление значительно позже). В рассматриваемой работе много места уделено дальше приложению указанных идей к вопросам физиологии растений и животных; изложение их не входит в нашу задачу.

Хотя основные идеи Майера и отличались большой ясностью, но новизна и общность их, а также мелкие недостатки изложения помешали быстрому признанию их, и его работы проходили почти незамеченными или встречали даже враждебный прием.

Первая работа Джоуля, касающаяся превращения работы в теплоту, была напечатана в 1843 г.,[3] но уже и раньше Джоуль сделал несколько работ, указывающих на связь между электрическими и тепловыми явлениями. В рассматриваемой статье Джоуль описывает свой опыт над получением тока в индукционной спирали, вращающейся между магнитами. Спираль эта помещена была в стеклянной трубке, наполненной водой; эта трубка служила калориметром для измерения теплоты, получающейся вследствие электрического тока. Вращение спирали вызывалось падением грузов. Таким образом могла быть измерена, как затраченная на вращение механическая работа, так и получающаяся теплота. В опыте этом получилось у Джоуля, что нагреванию какого-либо количества воды на 1° Фаренгейта соответствует работа, равная подъему того же количества воды на высоту 838 англ. фут., что дает для механического эквивалента тепла значение в метрических мерах равное 460 кг/м. Для сравнения с этим числом он приводит данные непосредственного определения этой величины посредством опыта над прогонянием жидкости через узкие трубы, в котором получилась величина механического эквивалента тепла, равная 770 фунто-футам в английских мерах (423 кг/м). В виду трудности этих опытов Джоуль считает эти результаты достаточно близкими друг к другу и на них основывает свои общие заключения.

---

[1] Вопросу об использовании тепла в паровых машинах было посвящено специальное сообщение Майера Мюнхенской Академии Наук: «Über die Bestimmung des Nutzeffectes verschiedener Motore». Заметка эта перепечатана в издании Вейрауха: «Kleinere Schriften und Briefe».

[2] Th. Young. A course of lectures on natural philosophy. London, 1807.

[3] Joule. On the caloric effect of magneto electricity and on the mechanical value of heat. Philos. Magaz. (3), t. 23, стр. 263, 347, 435. 1843.

Он говорит, что основные силы природы не уничтожаемы; во всех случаях, в которых происходит затрата силы, является пропорциональное этой затрате количество тепла.

В следующие годы появился ряд дальнейших работ Джоуля. Мы упомянем только о некоторых из них. Первая из этих работ, появившаяся в 1845 г., [1] касается затраты работы, необходимой для сжатия газов. Чтобы быть уверенным, что повышение температуры газа при сжатии зависит только от внешней работы, а не от других причин, например от изменения темплоемкости, Джоуль произвел при этом дополнительный свой опыт над расширением сильно сжатого в одном сосуде газа в пустой другой сосуд без совершения внешней работы, причем заметного изменения температуры не происходит. Опыт этот приводит к заключению о независимости внутренней энергии газов [2] (так называемых идеальных) от объема. Это свойство идеальных газов называется иногда в настоящее время законом Джоуля.[3]

Более позднее и точные опыты, произведенные Джоулем сместно с Томсоном,[4] показали, что реальные газы дают при указанном расширении температуры так называемый «эффект Джоуля-Томсона», изучение которого дает важные указания относительно уравнения состояния и прочих свойств реальных газов.

Опыт Джоуля с воздухом и доказанная им с достаточной точностью независимость внутренней энергии воздуха от объема важны еще в том отношении, что только в предположении независимости энергии газа от объема является правильной формула Майера для нахождения разности теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме. Между тем эта формула послужила для Майера основанием при определении величины механического эквивалента тепла. Это обстоятельство явилось одним из оснований к оспариванию заслуг Р. Майера в вопросе об открытии закона сохранения энергии. Это замечание было сделано английским физиком Тэтом (Tait), [5] вообще являющимся большим противником Р. Майера. Это возражение Тэта, однако, отпадает, так как Майер совершенно ясно отдает себе отчет в необходимости указаний предпосылки для своей формулы; но для обоснования этой предпосылки он пользуется опытом Гей Люссака (Gay-Lussac), совершенно аналогичным опыту Джоуля и сделанном еще в 1807 г. [6]

---

[1] Joule. On the changes of temperature produced by the rarefaction and condensation of air. Philos. Magaz. (3) 26, стр. 369, 1845.

[2] Применяя современную терминологию.

[3] Например, О. Д. Хвольсон. Курс физики, т. III, стр. 491.

[4] Joule and Thomson. On the thermal effects of air rushing through small apertures. Philos. Magaz. (4), т. 4, стр. 481. Они же: On the thermal effects of fluids in motion. Philos. Transact., стр. 357, 1853 г.; стр. 321, 1854.

[5] Сначала в популярном журнале «Good Words» в 1862 г., а затем в ряде других статей и сочинений. Заметка вызвала ответ со стороны другого известного английского физика Тиндаля (Tyndall), являющегося горячим защитником заслуг Р. Майера.

[6] Р. Майер. Русск. пер., стр. 160. Мемуар Гей-Люссака, напечатанный в малораспространенных журналах того времени, перепечатан, как приложение к вышецитированной книге Маха.

В том же 1845 г. начали появляться работы Джоуля по определению механического эквивалента тепла посредством нахождения повышения температуры вследствие трения жидкости при вращении в ней мешалки, причем это вращение вызывается падением грузов с определенной высоты. Этот способ для определения механического эквивалента тепла является наиболее известным и описывается во всех учебниках. Работы Джоуля по этому способу появились в 1845, 1847 и 1850 гг. Последняя работа привела Джоуля к значению для механического эквивалента тепла, равному 423,55 кг. Это значение (с округлением до 424) долгое время считалось наиболее точным: оно действительно крайне мало отличается от ныне принятого (тоже округленного) значения, равного 427 кг.

Работы Джоуля продолжались и дальше, но рассмотрение их выходит уже за пределы наших интересов. Хотя и работы Джоуля не повели ко всеобщему признанию новых идей о теплоте, но, будучи напечатаны в крупных научных журналах, они все же обратили на себя внимание научного мира, тем более, что в духе новых теорий появились одновременно с ними и другие работы (Кольдинга, Гольцмана, Сегена, Грове и др.). Однако, для окончательного торжества новой теории недоставало законченного и полного изложения ее, которое удовлетворяло бы вполне требованиям научной строгости. Это изложение было дано Германом Гельмгольтцем в 1847 г. в мемуаре «О сохранении силы», который представляет собой речь, прочитанную в Берлинском Физическом обществе и был издан отдельной брошюрой в том же году. Взгляды Гельмгольтца отличаются от взглядов Майера в том отношении, что последний принимал ряд качественно различных форм энергии (движение, тяжесть, теплоту, электричество и т. д.), тогда как Гельмгольтц видит во всех явлениях механическую основу и различает только 2 вида энергии, живую силу (в настоящее время называемую кинетической энергией) и силы натяжений («Spannungskräfte» — та форма энергии, которая в настоящее время называется потенциальной). Тогда закон сохранения энергии выразится очень просто, как закон сохранения живой силы. [1] При этом он исходит из той мысли, что все явления природы должны объединяться как движения системы тел, подчиненных силам притяжения и отталкивания, которых величина для двух взаимодействующих частиц есть функция только их взаимного расстояния, а направление совпадает с линией, соединяющей эти частицы. В дальнейшем содержании своей работы он рассматривает различные физические явления с целью обнаружения, каким образом в них проявляется закон сохранения энергии. Самым простым случаем являются чисто механические явления, к которым закон живых сил применялся и раньше: прежде всего все явления, происходящие под действием силы тяжести, затем — все движения небесных тел, подчиненных законам притяжения.

---

[1] Заметим, что Гельмгольтц тоже определяет живую силу как $^1/_2\, mv^2$, как это уже было сделано Кориолисом. Гельмгольтц везде применяет термин «сила» в смысле «энергии»; мы будем пользоваться последним термином.

К этой же категории принадлежат все случаи передачи движения при помощи твердых тел и абсолютно упругих, а также несжимаемых и упругих жидкостей.

Затем он рассматривает те явления, в которых замечается исчезновение части механической энергии. К ним относятся:

1) Удар не упругих тел; в этом случае получается изменение формы тел, чем вызываются известные силы натяжения. Кроме того, при этом получается звук и развивается теплота.

2) Трение. Силы трения тоже вызывают уменьшение энергии движущегося тела. Но при этом возникают некоторые силы натяжения сдавливаемых тел, и могут получаться также электрические явления, а главное, появляется теплота. Поэтому возникает вопрос, соответствует ли всегда одному и тому же количеству механической энергии одно и тоже количество появляющегося тепла, т.е. вопрос о механическом эквиваленте тепла. В этом вопросе Гельмгольтц ссылается на работы Джоуля. В дальнейшем Гельмгольтц касается вообще вопроса о материальной теории тепла, о неуничтожаемости тепла, причем касается и взглядов Клапейрона и Карно. Гельмгольтц указывает на возможность безграничного увеличения количества тепла (например, при трении, ударе неупругих тел), ссылаясь при этом, между прочим, на опыт Дэви. Эти явления противоречат материальной теории тепла.

Последняя, самая большая часть работы Гельмгольтца касается явлений электричества и мы на ней останавливаться не будем. Оценивая всю работу Гельмгольтца в целом, надо сказать следующее: конкретное рассмотрение отдельных явлений с точки зрения сохранения энергии, сделанное в очень ясной и строго научной форме (свободное от мелких ошибок и технических недостатков изложения Майера), конечно, должно было в значительной степени содействовать признанию истинности закона сохранения энергии. В том же смысле должна была действовать и общая постановка вопроса о сведении рассмотрения явлений природы к изучению движений системы точек, подчиненных действию сил, имеющих потенциал (так называемой «консервативной системы»).

Это представление действительно играло крупную роль в дальнейшем развитии теоретической физики. Но с другой стороны, это представление о сущности физических явлений суживает круг возможных объяснений и само по себе может вызывать возражение. [1]

Ряд работ, посвященных закону сохранения энергии и новой теории тепла, все более и более возрастает в последующую эпоху и мы не будем останавливаться дальше на его истории. Мы укажем только, что около 1850 г. начали появляться работы, пытающиеся дать конкретную картину движения мельчайших частиц тела, вызывающих теплоту. Одна из первых работ этого рода, принадлежащая Джоулю, напечатана была

[1] Ср. оценку сочинения Гельмгольтца, даваемую Энгельсом в «Диалектике природы» и приведенную в цитированном переводе работ Майера, стр. 50—51.

в 1850 г.[1] В ней дана была первая попытка представить тепловое движение в газах, именно принять в газах прямолинейное движение молекул, происходящее с большими скоростями. Давление газа при этом вызывается ударами этих частиц о стенки сосуда; температура газа в этой теории принимается пропорциональной средней живой силе движения молекул. Это представление о газах, возобновляющее идеи Даниила Бернулли (Daniel Bernulli), высказанные им в XVIII столетии, получило быстрое развитие в 50-х годах XIX столетия в работах Уотерстона, Крёнига и особенно Клаузиуса, [2] давшего в 1857 г. систематическое изложение основ в кинетической теории газов. Это динамическое конкретное представление о природе тепла в газах дало возможность назвать новое учение о теплоте «механической теорией тепла» — названием, которое долго держалось и только позже заменено было современным названием «термодинамика».

Нам надо обратиться теперь к другому ряду работ, именно к тем работам, которые имели целью согласовать закон сохранения энергии со взглядами Карно и Клапейрона на получение работы посредством теплоты. Эти работы, почти одновременно появившиеся, принадлежат В. Томсону (W. Thomson), впоследствии получившему имя лорда Кельвина, и Р. Клаузиусу. Они повели к созданию второго закона термодинамики, имеющего особенно важное значение для теплотехники.

Создание второго закона термодинамики

Мы видели при изложении идей Карно, что для него совершение работы посредством тепла было связано только с понижением температуры рабочего тела. Таким образом, после совершения работы на нижнем уровне окажется столько же тепла, сколько его было на верхнем. Взгляд этот не может быть согласован с законом сохранения энергии. Согласно этому закону количество тепла на нижнем уровне должно быть меньше количества тепла на верхнем уровне как раз на величину полученной внешней работы. Однако, закон сохранения энергии ничего не говорит об этом количестве теплоты, превращенной в работу. Так, Р. Майер говорит: «потребление тепла или превращение тепла в движение основывается на том, что количество тепла, которое берется от паров, всегда больше того количества, которое снова выделяется парами в окружающую среду при их сгущении.

[1] Joule. Some remarks on heat and the constitution of elastic fluids. Mem. of the Philos. Soc. of Manchester (2), Vol. IX, стр. 107, 1851 г. Работа эта представляет собой доклад, прочитанный в Манчестерском философском обществе еще в 1848 г.

[2] Waterston. Rep. of 21 Meeting of Brit. Assot. 1851.

Krönig. Pogg. Annalen, т. 99, стр. 315, 1856.

Clausius. Über Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. Pogg. Annal., т. 100, стр. 353, 1857.

Заметим кстати, что одновременно с этим Ренкин (Rankine) дал другую картину теплового движения, именно представлял его в виде колебательного движения атмосферы, окружающей атомы. Но представление это не получило развития.

Разница и дает целесообразно использованное или превращенное в механический эффект тепло». [1]

В первой работе Майера та же мысль высказана в следующей яркой форме: [2] «Локомотив с его поездом может быть сравнен с перегонным аппаратом; тепло, разведенное под котлом, превращается в движение, а таковое снова осаждается на осях колес в качестве тепла». В этом утверждении превращение тепла в работу и работы в теплоту трактуются как совершенно одинаково возможные и между ними не проводится существенного различия, устанавливаемого вторым началом термодинамики, а именно, что работа может превращаться в теплоту полностью, тогда как теплота превращается в круговых процессах в работу только частично, остальная же часть ее при этом просто переходит от источника тепла высшей температуры к источнику тепла низшей температуры. Установление этого факта с выводом имеющих место при этом соотношений составляет заслугу Р. Клаузиуса и В. Томсона. [3]

Первая работа Клаузиуса появилась в 1850 г., [4] первая работа В. Томсона, в которой ясно проведена его формулировка второго начала термодинамики, напечатана была в 1851 г.;[5] взглядами Карно и попытками соединения их с опытами Джоуля, Томсон занимался и раньше (например, в работе 1849 г.),[6] но тогда взгляды его еще не получили полной определенности.

Клаузиус прежде всего точно формулирует принцип эквивалентности между теплотой и работой и называет его первым началом механической теории тепла. Затем он переходит к рассмотрению круговых процессов и прежде всего к рассмотрению кругового процесса Карно (применяя графическое изображение процесса, выведенное Клапейроном). Согласно первому закону термодинамики теплота, заимствованная от источника высшей температуры, частью (в количестве Q) обратится в работу, частью же

---

[1] Р. Майер. Органическое движение, русск. пер., стр. 99.

[2] Р. Майер. Замечания о силах неживой природы. Там же, стр. 85.

[3] Работы Клаузуса были в переработанном виде изложены в его трактате о механической теории тепла.

R. Clausius. Die mechanische Wärmetheorie. Braunschweig, 1887—1891.

Работы В. Томсона помещены в собрании его сочинений: Lord Kelvin. Collected Papers.

Основные работы С. Карно, Р. Клаузиуса и В. Томсона изданы по-русски в сборнике под редакцией проф. А. К. Тимирязева «Второе начало термодинамики». ГТТИ, 1934. Биография В. Томсона и оценка его работ в разных областях жизни и техники даны в специальном номере журнала «Электричество», напечатанном по случаю столетия со дня его рождения. Электричество, № 16, 1924.

[4] K. Clausius. Über die bewegenge Kraft der Wärme uzw. Pogg. Annal. т. 79, стр. 368, 1850.

[5] W. Thomson. On the dynamical theory of heat etc. Edinburgh. Trans. т. 20, стр. 261, 1851.

[6] W. Thomson. An account of Carnot's theory of the motive power of heat. Edinb. Trans., т. 16, стр. 5, 575, 1849.

(в количестве Q_2) перейдет к источнику тепла низшей температуры; будем иметь очевидно

$$Q_1 = Q_2 + Q.$$

В этом равенстве и заключается поправка, сделанная Клаузиусом к выводам Карно (у последнего было бы просто $Q_1 = Q$). Далее он ставит для этого процесса (по современной терминологии кругового, обратимого) вопрос: [1] «существует ли между тем количеством тепла, которое превращается в работу или из нее получается, и тем количеством теплоты, которое переходит от более теплого тела к более холодному (или наоборот) зависимость, имеющая всеобщий характер или же эта зависимость изменяется сообразно природе тела, участвующего в явлении». На первый вопрос Клаузиус отвечает утвердительно и показывает, что для рассматриваемого процесса отношение количеств тепла Q_1 и Q_2 будет зависеть только от температур T_1 и T_2 источников тепла:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2).$$

Для общего доказательства этого положения Клаузиус пользуется введенным им «постулатом» («постулат Клаузиуса»): «переход теплоты от более холодного тела к более теплому не может иметь места без компенсации»; [2] так как для идеальных газов в цикле Карно отношение

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

то и вообще должно быть

$$f(T_1, T_2) = \frac{T_1}{T_2}.$$

В дальнейшем Клаузиус рассматривает более сложные обратимые циклы с несколькими источниками тепла; назвав температуры этих источников $T_1, T_2 \ldots T_n$ и количества тепла, заимствованные от этих источников — $Q_1, Q_2 \ldots Q_n$ (с соответствующими знаками), Клаузиус приходит к выражению

$$\sum \frac{Q}{T} = 0.$$

Для непрерывного кругового обратимого процесса получается вместо суммы — интеграл

$$\int \frac{dQ}{T} = 0.$$

Далее Клаузиус вводит важное понятие «э н т р о п и и», определяя ее математически дифференциалом

$$ds = \frac{dQ}{T},$$

[1] Стр. 131 выше названного русского издания.

[2] Русск. пер., стр. 134.

где dQ — количество тепла, соответствующее какому-либо бесконечно малому обратимому процессу.

Для необратимых процессов вышеприведенные равенства обращаются в неравенства:

$$\sum \frac{Q}{T} < 0.$$

$$\int \frac{dQ}{T} < 0.$$

Из указанных равенств и неравенств следует, что энтропия изолированной системы тел не меняется при обратимых процессах и увеличивается при необратимых. Так как обратимые процессы представляют собой только идеальные схемы действительных процессов, то все реальные процессы, происходящие в природе, являются необратимыми, а потому в природе должно происходить непрерывное возрастание энтропии.

В одной из позднейших своих работ [1] Клаузиус кратко сформулировал сущность первого и второго законов термодинамики в следующих двух положениях:

1) энергия мира постоянна;

2) энтропия мира стремится к максимуму.

Это последнее положение подвергалось и подвергается в настоящее время самой серьезной критике, как с точки зрения позднейших достижений самой физики, так и с общефилософской точки зрения. В настоящем сочинении невозможно, конечно, даже затронуть относящиеся сюда вопросы; можно только указать, что эта критика привела к выводу, что второй закон термодинамики не имеет абсолютного значения. «Если рассматривать тепло как форму движения (как это сделал Больтцман),[2] т. е. рассматривать его как движение огромного числа молекул, из которых построены все тела вокруг нас самих, то закон возрастания энтропии есть вывод, основанной на теории вероятностей.

Из этого вовсе не следует, что процессы, при которых энтропия уменьшается, абсолютно невозможны. Закон возрастания энтропии с точки зрения Больтцмана означает только то, что любая система в течение огромных периодов времени находится в состоянии, близком к своему тепловому равновесию и что промежутки времени, в течение которых эта система находится в состоянии, далеком от максимального значения энтропии, составляют исчезающе малую часть по сравнению с теми периодами, в течение которых энтропия близка к своему максимуму. Но отсюда следует, что если мы рассмотрим промежутки времени достаточно большие, то эти

---

[1] Poggendorf's Annalen, т. 125, 1865.

[2] Работы Больтцмана (L. Boltzmann) по кинетической теории начинаются еще с 1866 г. Но с его взглядами удобнее знакомиться по его лекциям по кинетической теории газов. L. Boltzmann. Vorlesungen über Gastheorie, Leipzig, 1896—1898.

состояния, хотя и мало вероятные с точки зрения теории вероятности, не только могут наступить, но должны наступить». [1]

Независимо от различных толкований и разнообразных попыток обоснования второго закона и понятия энтропии, выводы из второго закона сделались в чисто математической формулировке в дальнейшем одним из важнейших положений теоретической физики, а после работ Гиббса и ряда других ученых получили также большое значение и в физико-химии. Они являются тоже основой целого ряда приложений в технической термодинамике (в теории газов, паров, термических двигателей и разного рода графических методов).

Что касается работ В. Томсона, то в общем он приходит к тем же выводам, что и Клаузиус, но подходит к ним самостоятельным путем. Для обоснования второго закона он принимает крайне интересное положение, имеющее чисто технический характер: «невозможно при помощи неодушевленного материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическую работу путем охлаждения ее ниже температуры самого холодного из окружающих предметов». [2] В более точной формулировке М. Планка та же мысль высказана в следующих словах: [3] «Невозможно построить периодически действующую машину, вся деятельность которой сводится к поднятию тяжести и охлаждению теплового резервуара». Двигатель, работа которого противоречила бы этому принципу, получил название «perpetuum mobile второго рода». Поэтому постулат Томсона часто кратко характеризует как «принцип невозможности построения perpetuum mobile второго рода». В этой формулировке принцип этот очень удобен также и для практических приложений, например, для оценки некоторых изобретений двигателей, заключающих в себе противоречие этому началу.

Идея Клаузиуса о понижении работоспособности, непрерывно происходящем вследствие совершающихся необратимых процессов, выражена была Томсоном в работе 1852 г. [4] Он говорит в ней о «стремлении природы к расточению («dissipation») механической энергии». Идея эта, как универсальный принцип, встречает те же возражения, как и формулировка Клаузиуса.

Мы остановились долго на открытии основных законов термодинамики в виду их чрезвычайной важности для всей теплотехники, особенно же

---

[1] Эта характеристика взглядов Больтцмана взята из предисловия проф. А. К. Тимирязева к вышеупомянутому сборнику «Второй закон термодинамики». Современное изложение второго закона термодинамики с обоснованием его на положениях статистической механики дано, например, в книге Я. И. Френкеля. Статистическая физика ГТТИ 1933 г.

[2] Второе начало термодинамики. В. Томсон. Динамическая теория теплоты, стр. 165.

[3] М. Планк. Термодинамика, стр. 97, Госиздат, 1925.

[4] W. Thomson. On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. Proc. Royal Soc., 19 апреля 1852.

для теории тепловых двигателей. Теперь нам надо посмотреть, какое приложение нашли законы термодинамики в ближайшее же к ним время, т. е. в пятидесятые и шестидесятые годы.

Исследование свойств водяного пара

Мы говорили об опытах над свойствами паров, исполненными в первой трети XIX столетия, служивших основанием для расчетов в области паровых машин. Многие данные, при этом полученные, были не точны, а потому и вычисления в области паровых машин и вообще теплотехники не отличались большой точностью. В виду того значения, которые приобрели паровые машины (и вообще теплотехника), в начале 40-х годов по поручению французского правительства были предприняты обширные опыты над определением величин, входящих в тепловые расчеты. Ведение этих опытов было поручено Реньо (Regnault). Опыты эти составляют эпоху не только в теплотехнике, но и вообще в экспериментальной физике, так как для получения возможно большей точности в них были выработаны совершенно новые приемы измерений.

Результаты этих опытов печатались в «Известиях Парижской Академии Наук», начиная с 1840 г., а затем все они были собраны в 3 больших томах мемуаров той же Академии, из которых первый появился в 1847 г., второй — в 1862 и 3-й — в 1870 г. [1] В работах Реньо затронуты не только вопросы, связанные с паровыми машинами, но в них разработаны также многие общие вопросы термометрии, предложены новые, более совершенные конструкции термометров, исследованы свойства ртути, знание которых необходимо для правильных измерений температуры, а также изучен вопрос о газовом термометре. Очень подробно и тщательно исследованы свойства газов, их отклонения от законов Бойль-Мариотта и Гей-Люссака, а также вопрос о теплоемкостях газов. Но особенное внимание уделено воде и водяному пару, а также парам некоторых других жидкостей; для этих жидкостей и паров найдены все тепловые характеристики (плотность жидкости при разных температурах, давление насыщенного пара, плотность насыщенного пара, теплота жидкости, скрытая и полная теплота испарения и т. д.). Для воды исследованы также (хотя и в небольшом интервале) свойства перегретого пара.

Ценным качеством мемуаров Реньо является то, что он сообщает не только окончательные обработанные результаты своих наблюдений, но приводит подробное описание опытов и все непосредственные результаты наблюдений. В виду этих качеств опытов Реньо они на долгое время сделались главным источником сведений по свойствам газов и паров и служили основанием для теоретических выводов в этих областях. В Англии

[1] Полное название отчета об этих опытах: «Relation des expériences pour déterminer les principales lois et les données numériques qui entrent dans le calcul des machines à vapeur. Mém. de l'Acad. de France, т. XXI, 1847, т. XXVI, 1862, т. XXVII, 1870. Биография Реньо и обзор его работ помещены в статье: Dr. Heller «H. V. Regnault». Beiträge zur Geschichte der Technik, т. II.

обработкой данных Реньо при помощи законов термодинамики занимались В. Томсон и Ренкин, [1] в Германии — Клаузиус [2] и особенно Цейнер. Во Франции самостоятельные опыты как над определением механического эквивалента тепла, так и над свойствами паров производил Гирн. При помощи термодинамической теории этим ученым найден был целый ряд важных свойств пара (преимущественно насыщенного): введено было понятие паросодержания или степени сухости пара, полная скрытая теплота парообразования разложена была на 2 составные части: внутреннюю, связанную с работой разъединения молекул при парообразованиях, и другую — внешнюю, идущую на совершение работы расширения во время парообразования. В связи с этим рассмотрением и при помощи рассмотрения цикла Карно Клаузиус нашел формулу, связывающую изменение объема при парообразовании с величиной скрытой теплоты: формула эта была уже намечена Клапейроном и носит название формулы Клапейрон-Клаузиуса. Формулировка эта очень важна, так как позволяет корригировать величины объемов сухого насыщенного пара, с трудом получаемые с достаточной точностью из непосредственного опыта. Надо заметить, что аналогичная формула выводится и для явления плавления твердых тел и она привела там к открытию важного явления понижения точки плавления льда при повышении давления. Явление это исследовано было теоретическим путем Джемсом Томсоном (J. J. Thomson), братом Вильяма Томсона, а затем подтверждено экспериментальными опытами последнего. [3]

Клаузиусу принадлежит также интересный вывод отрицательной теплоемкости при расширении паров воды по кривой сухости и насыщения.

Цейнер [4] дал систематическое изложение всей теории паров и составил обширные таблицы свойств паров, которые являлись общепринятыми до

---

[1] Работы Ренкина, касающиеся паров, весьма многочисленны; они изложены в книге Ренкина о паровых машинах. W. Rankine. The steam engine. 1 издание появилось в 1859 г. Книга эта выдержала большое количество изданий (в 1897 г. 14-е издание), постепенно расширяемых и перерабатываемых после смерти Ренкина другими авторами. Она явилась для Англии таким же основным трудом, как для Германии термодинамика Цейнера.

[2] Статьи Клаузиуса по парам начинаются в 1851 г. Систематическое изложение дано в вышецитированном сочинении: «Die mechanische Wärmetheorie».

[3] Работа James Thomson напечатана была в Trans. R. Soc., Edinbourgh, т. XVI, стр. 5, 575, 1849. Работа W. Thomson, Philos. Mag. (3), т. XXXVII, стр. 123, 1851.

[4] Работы Цейнера о парах изложены полностью в его курсе технической термодинамики, первое издание которого вышло в 1860 г. под названием «Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie, 1860 г., 2-е — чрезвычайно расширенное и переработанное издание — в 1865—1866 гг., 3-е — вновь переработанное под названием «Технической термодинамики» — в 1887—1890 гг., 4 издание в 1902 г. и 5-е — в 1905—1906 гг. Кроме того, Цейнером напечатано большое количество статей и отдельных монографий, затем входивших в переработанные издания его «Технической термодинамики».

Первое издание книги Цейнера было переведено на русский язык В. Ф. Лугининым. Нелестящая характеристика Цейнера была сделана В. Л. Кирпичевым в некрологе «Г. Цейнер», напечатанном в «Вестн. технологов» за 1908 г. Подробные биографические сведения о Цейнере напечатаны были в журнале «Schweizerische Bauzeitung» за 1898 г. по случаю 70-летия Г. Цейнера.

начала XX века. Его изложение теории насыщенного пара и по настоящее время сохранило свое значение. Термодинамика Цейнера являлась до самого начала XX столетия главным трудом по этой науке, на который опирались все исследователи того времени. В области насыщенного пара дана была Цейнером полная систематическая теория с выводом всех необходимых формул и соотношений. Формулы и данные Реньо были здесь заново переработаны и приведены в обширных таблицах.

В издании 1866 г. и в позднейших изданиях была дана также полная теория перегретого водяного пара, основанная на опытах Реньо и Гирна (а затем — и на позднейших опытах Batelli и других). Из специальных выводов Цейнера особенное значение имел вывод свойств адиабаты для насыщенного пара. В отличие от прежних взглядов, Цейнером было показано, что сухой насыщенный водяной пар частью конденсируется при адиабатическом расширении. Для паров эфира было доказано обратное свойство. Оба эти вывода подтверждены были позднейшими опытами Гирна. Во втором издании были даны также формулы для истечения газов, являющиеся и в настоящее время основными в теории паровых турбин. Данные об истории этого вопроса будут приведены нами в соответствующем отделе книги. Следует сказать, что тогда же Цейнер сделал приложение найденных им формул для истечения газов и паров к объяснению действия конуса паровоза и инжектора Жиффара (Giffard).

Работы Гирна[1] (Hirn) по определению механического эквивалента тепла появились в 1859 г. [2] Они сыграли большую роль в утверждении механической теории тепла, во-первых — по оригинальности некоторых применявшихся методов, например, известный опыт его над определением механического эквивалента посредством определения повышения температуры при неупругом ударе; во-вторых—вследствие близкого совпадения результатов, полученных Гирном, с данными опытов Джоуля; в-третьих — вследствие производства обратного опыта: определения механического эквивалента тепла посредством изучения превращения теплоты в работу в то время, как опыты Джоуля производились над превращением работы в теплоту. Для этой цели послужили опыты, произведенные Гирном с паровой машиной. Опыты эти представляли большую трудность и самым Гирном были не совсем правильно истолкованы, но Клаузиус сделал соответствующие принципиальные поправки, [3] и результат получился весьма удовлетворительный (именно 413 кгм).

---

[1] Густав Адольф Гирн является вообще одним из главных ученых, исследовавших работу пара в паровой машине. Его биография помещена была в журнале «Beiträge zur Geschichte der Technik», т. 3 (статья Dr. Heller).

[2] G. A. Hirn. Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur. Colmar et Paris, 1858.

[3] Опыты Гирна были представлены еще в 1855 г. в Физическое общество в Берлине и тогда же реферированы Клаузиусом в Fortschritte der Physik, 1855.

Работы Гирна над свойствами водяного пара многочисленны. Они в обработанном виде использованы в его «Механической теории тепла, [1] явившейся основным трудом по этому предмету во Франции.

Термодинамика двигателей, работающих нагретым воздухом

В работах Клаузиуса, Ренкина, Цейнера, Гирна и других ученых 50-х и 60-х годов приведены были исчерпывающие для того времени данные о свойствах газов и водяных паров. В связи с общими законами термодинамики эти данные позволили построить общую теорию тепловых двигателей и паровых машин. Это и было сделано указанными авторами, работы которых появлялись почти одновременно и дополняли друг друга.

Первый факт, который должен быть отмечен — это то сильное впечатление, которое произвело установление чрезвычайно малого полного экономического коэффициента полезного действия паровой мащины. Малость этого коэффициента заставила прежде всего обратить внимание на другие двигатели; но в это время (т. е. в 50-е годы), кроме паровой машины, стали появляться сведения только о двигателях, работающих нагретым воздухом, которым уделяется чрезвычайное внимание в технической литературе того времени. Казалось, что проще всего было бы построить двигатель, работающий нагретым воздухом просто по циклу Карно, причем получился бы наибольший возможный коэффициент полезного действия, но не трудно было убедиться в неосуществимости этого проекта: объем такого двигателя был бы слишком велик, а работа слишком мала и поглощалась бы трением. При применении же неполного расширения получался низкий коэффициент полезного действия. Поэтому пришлось искать других решений и одно из них получило большую известность в 1852 г., именно двигатель Эриксона, [2] работающий нагретым воздухом, снабженный так называемым регенератором. В 1852 г. судно, снабженное 4 двигателями Эриксона, прибыло из Америки в Англию и привлекло к себе всеобщее внимание, причем в особенности в газетах и популярной литературе двигателю Эриксона приписывались самые удивительные свойства: необыкновенная мощность и экономичность, значительно превосходящая экономичность паровой машины. В связи с этим вспомнили более раннее (первое предложение его

---

[1] Книга Гирна появилась в первом издании в 1854 г. Затем она была переработана и расширена в двух последующих изданиях; особенное значение имеет ее 3 издание: «Exposition analytique et expérimentale de theorie mécanique de la chaleur par G. A. Hirn, Paris, 1875—1876.

[2] Об Эриксоне мы упоминали уже при описании состояния паровозов в Ренгилле. История его изобретения (а также и вообще история двигателей, работающих нагретым воздухом) изложена у Knocke «Kraftmaschinen des Kleingewerbes», Berlin, 1899, стр. 76 и след. Биографические сведения об Эриксоне помещены в его некрологе: Slaby. «Gedächtnissrede über Ericsson». Verh. des Ver. zur Beförd. des Gewerbes, 1890.

было сделано в 1816 г.) изобретение Стирлингов (Robert и James Stirling),[1] которые предлагали двигатель, тоже работающий нагретым воздухом и тоже снабженный регенератором, но совершающий свою работу по другому циклу, чем двигатель Эриксона. Двигатели эти вызвали большие ожидания; но тогда же более тщательные исследования показали сомнительность ожидаемых результатов. Специальное исследование машины Эриксона было произведено Редтенбахером. [2] Он доказывает гораздо меньшую мощность двигателей Эриксона, чем указывалось в первых сведениях об этом двигателе: несмотря на колоссальные размеры (D=4200 мм, H=1800 мм), общая мощность 4 двигателей не превосходила 300 л. с. (а по расчетам Редтенбахера — даже 170 л. с.), расход угля был немногим меньше расхода паровых машин.

Во всяком случае появление двигателей, работающих нагретым воздухом долгое время поддерживало надежду на замену ими паровой машины и сам Редтенбахер, повидимому, разделял эти надежды, так как писал Цейнеру (в 1856 г.) о ложности самого принципа работы паровой машины [3] и о вероятной замене ее другими двигателями. Общая теория регенеративного процесса была дана Ренкиным, [4] а позже Цейнером (во 2-м и позднейших изданиях «Технической термодинамики»). Двигателями с нагретым воздухом занимались и раньше появления двигателя Эриксона и продолжали заниматься и позже; один из возможных циклов предлагал еще раньше Джоуль; [5] процесс этот интересен в том отношении, что является прототипом цикла, фактически исполненного в дизельмоторе. Теория позднейших двигателей изложена у Цейнера в «Технической термодинамике»), описание у Knocke. [6]

Идея регенератора, т. е. устройства, в одной части процесса заимствующего теплоту, а на другой части процесса—отдающего ее рабочему телу, принадлежит Сименсу (W. Siemens); [7] она с успехом осуществлена им в известных печах, применяемых в сталелитейном производстве.

Двигатели же, работающие нагретым воздухом с регенераторами и без них не получили никакого практического значения и применяются иногда

[1] Сведения о двигателе Стирлинга помещены в журнале: «Proc. Inst. Civil engneers» за 1854 г. Конструкция этого двигателя тоже описана у Knocke, теория имеется, например, в книге Weyrauch «Grundzüge der Wärmetheorie». Stuttgart, 1905.

[2] Redtenbacher «Der calorische Maschine». 2-te Aufl., Mannheim, т. I, 1853; это 2-е издание является сильно расширенным.

[3] Письмо это напечатано в статье Цейнера в журн. «Civilingenieur», 1896.

[4] Rankine. Philos. Trans., 1854, стр. 115 и «Manual of the steam engine», 1858 и позднейшие в 14 издании 1897, стр. 345. и след.

[5] Joule. Philos. Trans., 1851.

[6] Zeuner. Technische Thermodynamik, Bd. I; изд. 1905 г., стр. 277 и сл. Knocke, цитир. соч., и след., 1851.

[7] Сименс восстанавливает свой приоритет в этом отношении в заметке, помещенной в «Comptes rendus» т. XL, стр. 9, 1855; см. также его статью в журнале «Cosmos». Siemens. Machine à vapeur regéneré, т. VII, стр. 311, 437, 1855. История вопроса изложена в статье Zetsche, «Beitrag zur Geschichte der Regeneratoren». Polytechn. Zentralblatt, стр. 1441, 1872.

для самых малых мощностей, работая, например, на натуральном газе в небольших насосных установках в Соединенных Штатах, в лабораториях и тому подобных устройствах.

Значительно позже сделаны были попытки осуществить в паровых машинах идею, схожую с регенераторным устройством, именно, отбор части пара из ресивера многоцилиндровых машин для подогрева питательной воды. Это устройство только до известной степени схоже с регенератором, применявшимся в двигателях с нагретым воздухом, так как в последних регенератор представляет собой «особый», «третий» резервуар тепла (при двух основных источниках тепла), количество же рабочего тела не меняется; между тем, в процессе паровой машины (и позже — паровых турбин) такого «третьего» резервуара тепла нет, а меняется количество рабочего тела. Поэтому теоремы термодинамики могут быть применяемы к такого рода процессам в паровых двигателях только с известными изменениями. Примером такого измененного рассмотрения для паровых машин является метод, предложенный Шюле (W. Schüle). [1]

Способ такого отбора тепла был предложен впервые Сименсом еще в 1848 г. (английский патент № 12 006) и назван им именно «регенеративным процессом», [2] но предложение это не было использовано и вновь предложено позже Коттерилем [3] для паровых машин. Это предложение особенного успеха не имело, но зато оно нашло широчайшее применение в современных паровых турбинах, о чем будет сказано позже.

Термодинамическая теория паровой машины

Наряду с обоснованием общей теории тепловых двигателей те же ученые занимались специально теорией паровых машин. Первые работы в этом направлении принадлежат Клаузиусу [4] и Ренкину. В дальнейшем Клаузиус мало занимался этим вопросом. Ренкин же развил свое исследование в полную теорию паровой машины. [5] Несколько позже в этом же направлении стал работать Цейнер, который продолжал свои работы и в дальнейшее время и излагал результаты своих исследований в последующих расширенных изданиях своей «Термодинамики».

Клаузиус и Ренкин исходят из одного и того же представления об «идеальном» процессе в паровой машине: это есть так называемый «цикл

[1] W. Schüle. Technische Thermodynamik. 1930, т. I, стр. 175 и след.

[2] Кроме этого предложения паровой машины с отбором пара для нагревания питательной воды, Сименс предложил позже (в 1856 г.) другое устройство, тоже названное «регенеративной паровой машиной», в котором предлагается устройство машины с перегретым паром, проходящим через регенератор. В описание его не входим, так как не получило никакого осуществления. Оно описано у Rankine «Steam engine», § 299.

[3] Cotterill. The steam engine. 3-е изд., § 165, 1896.

[4] Clausius. Über die Anwendung der mechanischen Wärmetheorie auf die Dampfmaschine. Poggendorff's Annalen, т. XCVII, стр. 441, 513, 1856.

[5] Rankine. On the thermodynamic theory of steam engines with dry saturated steam and its applications to practice. Proc. R. Soc., т. IX, стр. 626, т. X, стр. 183. Rankine. Manual of the steam engines, изд. 1859 г., part. III.

Клаузиуса — Ренкина», который и в настоящее время кладется в основу рассмотрения теории паровых двигателей.

Очень ясно сформулированы предположения, положенные в основу этого процесса, у Ренкина.[1] Предположения эти следующие: для машин, работающих насыщенным паром: 1) давление пара во время впуска остается постоянным; 2) в цилиндрах без паровой рубашки расширение пара происходит по адиабате (это название было предложено именно Ренкиным). В цилиндрах с паровой рубашкой количество передаваемого из нее тепла к расширяющемуся пару таково, что пар остается как раз сухим и насыщенным; 3) давление пара во время выпуска остается тоже постоянным и равным давлению конца расширения; 4) объемом воды можно пренебречь по сравнению с объемом пара. Для такого процесса при помощи формул, выведенных в термодинамике паров, можно найти величину работы, даваемой одной весовой единицей пара и среднее индикаторное давление, а, следовательно, и размеры цилиндра.

В это изложение вносится ряд практических поправок,[2] выражающих влияние различных усложняющих моментов в работе паровой машины: торможения пара при впуске, вредного пространства, периода сжатия, неполноты расширения, присутствия воды в цилиндре и теплопроводности стенок цилиндра (последние обстоятельства Ренкиным, впрочем, почти не рассматриваются).

Изложение Клаузиуса несколько затемняется сложной системой формул, им применяемых, но выводы его в общем те же, что и Ренкина. Интерес представляют у Клаузиуса сравнения для частных примеров результатов, получаемых по его формулам, с результатами, получаемыми по формулам Памбура.

Оказывается, что по формулам Памбура для различных случаев получается для 1 кг пара работа бо́льшая, от 6 до 4%.[3] В книге Ренкина надо еще отметить его вывод теории «бинарных» машин[4] («Binary vapour-engines»), по-немецки их называют машинами для отходящего тепла («Abwärmemaschinen»). Идея таких машин состоит в соединении двух машин, работающих парами двух различных жидкостей: одной — менее летучей, другой — более летучей (т. е. испаряющейся при более низкой температуре, причем пары ее имеют при этой температуре большее давление, чем пары первой жидкости). Для таких двух жидкостей возможно следующее устройство: первая, менее летучая жидкость испаряется в котле, нагреваемом посредством сжигания топлива. Пар этой жидкости проводится в первую паровую машину и совершает в ней работу. Затем он переходит в поверхностный конденсатор, в котором охлаждается второй, более летучей жидкостью. Полученный конденсат вновь возвращается в первый котел и продолжает повторять свой цикл. Этот поверхностный конденсатор является паровым котлом для второй жидкости, которая

[1] Ренкин. Цит. соч., § 278.

[2] Ренкин. Цит. соч., § 241.

[3] Clausius. Mechanische Wärmetheorie, таблица на стр. 390.

[4] Rankine. Steam engine, § 300—302.

испарившись в нем, совершает работу во второй паровой машине, а затем идет в свой поверхностный конденсатор, в котором охлаждается холодной водой. Первое такое устройство с парами воды и эфира (или хлороформа) было предложено французским инженером Дю Трембле (Du Tremblay) в 40-х годах. В 1850—1851 гг. он опубликовал специальное сочинение по этому вопросу.[1] В 1853 г. он построил специальное судно, снабженное бинарной машиной, работавшей парами воды и эфира. Машина дала при испытании благоприятные результаты, но в эксплоатации ее встретились большие трудности вследствие летучести и огнеопасности эфира; поэтому предприятие это скоро было оставлено. Однако эта неудача не остановила других изобретателей, которые время от времени предлагали разные комбинации бинарных машин. Одно из последних устройств этого рода (в области паровой машины) было предложено проф. Иоссе (Iosse), около 1900 г. В своем устройстве Иоссе предложил применить пары воды и сернистой кислоты. Опыты, произведенные в лаборатории Берлинской высшей технической школы дали благоприятные результаты, но широкого практического применения эти машины тоже не нашли. В новейшее время идея бинарной машины нашла применение в области паровых турбин и вообще вновь привлекает к себе внимание, о чем мы будем говорить позже.

Цейнер в своей основной теории паровой машины [2] рассматривает схематический процесс идеальной паровой установки, состоящей из котла, парового цилиндра, поверхностного конденсатора и компрессорного цилиндра. Обращение в воду предполагается в конденсаторе неполным, а оставшийся пар должен быть обращен в воду путем адиабатического сжатия. В этом устройстве, при отсутствии добавочных потерь как в паровом, так и в компрессорном цилиндре, получается та же работа, какая получалась бы по циклу Карно. Но в действительной машине имеется ряд потерь, которые Цейнер постепенно и рассматривает. Первой из них является потеря вследствие полного обращения пара в воду в конденсаторе и подачи ее в цилиндр паровой машины простым водяным насосом. Цейнер дает формулы для получаемой при этом потери в коэффициенте полезного действия; этот способ изложения придает предмету чрезвычайную ясность.

Так же тщательно и ясно рассматривается Цейнером потеря вследствие неполного расширения. Относительно влияния вредного пространства Цейнер доказывает замечательную общую теорему, которую можно сформулировать так: если принять закон расширения и сжатия одинаковым, то при работе машины с полным расширением (т. е. до величины противодавления) влияние вредного пространства уничтожается при применении сжатия до впускного давления. Теорема эта верна только в предположении отсутствия обмена тепла между паром и стенками цилиндра. Это предположение является основным в теории Цейнера, и в издании

[1] Du Tremblay. Manuel du conducteur des machines à vapeur combinées aux machines binaires (Lyon, 1850—1851). См. также статьи Du Tremblay в журнале «Annales des mines» за 1853 г.

[2] G. Zeuner. Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie. 2-е изд., Leipzig, 1866., стр. 425 и след.

1866 г. он вообще об этом влиянии не говорит. Вопрос о роли сжатия реальной машины был поставлен бельгийским ученым Двельсгауверсом-Дери (Dwelshauvers-Dery) в 1896 г. и был исследован им в ряде дальнейших работ,[1] причем это влияние сжатия оказалось гораздо более сложным, чем получается по теории Цейнера и наиболее выгодное сжатие даже при полном расширении далеко не доходит до давления впуска. Этот вопрос является характерным примером того усложнения, которое вводится в реальной машине в теоретические выводы влиянием обмена тепла между паром и стенками цилиндра. К изложению этого общего вопроса мы и переходим.

Экспериментальное изучение паровой машины

Точное изучение свойств паров и нахождение формул для работы пара, основанных на законах термодинамики, позволили поставить рационально опытное изучение паровых машин. Потребность в таком изучении настоятельно диктовалась экономическими условиями эпохи, требовавшими лучшего использования теплотворной способности топлива. Эта потребность особенно остро чувствовалась в районах с дорогим топливом (Эльзас), а также в тех областях применения, где экономия топлива имела особенно важное значение (судовые машины, паровозы). Пятидесятые и шестидесятые годы прошлого столетия характеризуется поэтому чрезвычайным развитием экспериментального исследования паровых машин. Это исследование повело к созданию так называемой «практической» или «экспериментальной» теории паровой машины, которая выяснила важнейшие вопросы относительно экономии расхода пара в паровой машине и наметила ясные пути к ее усовершенствованию в отношении расхода пара. Наиболее важные опыты этой эпохи принадлежат Гирну во Франции, Кларку — в Англии и Ишервуду — в Америке. [2] В позднейшее время

[1] Литература по этому вопросу чрезвычайно велика. Первые попытки Двельсгауверса-Дери были изложены на русском языке в статье А. А. Радциг: «Новейшие опыты Льежской лаборатории над влиянием сжатия». Вестн. Общ. технологов», 1897.

Статьи самого Двельсгауверса-Дери с полным изложением вопроса напечатаны были в журнале «Revue de Mécanique», 1897 г., стр. 925—940, 1898 г., 2-е полугодие, стр. 121—138. В том же году помещены были критические замечания Бульвена (Boulvin), (1-е полугодие, стр. 553—573); ответ Двельсгауверса-Дери, (2-е полугодие, стр. 139—145).

Дальнейшие статьи в том же журнале: 1898 г. Boulvin, (2-е полугодие, стр. 405—406; Dwelshauvers-Dery, 2-е полугодие, стр. 647; 1899 г.; 1-е полугодие, статьи Dwelshauvers-Dery, стр. 5—26; затем в обсуждении вопроса принимают участие и другие ученые: Анспах (Anspach), Надаль (Nadal) и др. в том же журнале. Позднейшие немецкие опыты Гейнриха (Heinrich) «Versuche über den Einfluss der Kompression» Forschungsarbeiten, Heft 146, 1914 г. показали тоже существование предела для наивыгоднейшего сжатия, но дали для влияния сжатия меньшие значения, чем в опытах Двельсгауверса-Дери. Имеются еще специальные опыты Клемперера (Klemperer), Forschungsarbeiten, Heft 1, 1905.

[2] Первые опыты Гирна над паровыми машинами появились в 1851 и 1857 гг. см. Hirn, Mémoire sur l'utilité des enveloppes à vapeur. Bull. Soc. industr. de

количество исследований и опытов в этой области делается так велико, что не может быть здесь приведено. [1]

Эти опыты привели к заключению о невозможности игнорировать явления обмена тепла между паром и стенками цилиндра, так как они играют чрезвычайно важную роль в экономии расхода пара. Теория этого явления была особенно глубоко развита Гирном и его школой и связывается с его именем.

Согласно взглядам Гирна свежий пар, входящий в цилиндр, встречает стенки последнего охлажденными во время впуска; вследствие этого пар осаждается в большом количестве на стенках цилиндра: происходит явление так называемой «начальной конденсации» при впуске. Стенки цилиндра принимают при этом высокую температуру, приблизительно равную температуре входящего пара. Во время периода расширения давление и температура пара понижаются и вода, осевшая на стенках, начинает испаряться, повышая линию расширения пара выше адиабаты.

В период выпуска вода, оставшаяся еще на стенках, испаряется, окончательно охлаждая стенки; затем процесс этот повторяется. Для количественного определения величин обмена Гирном и его последователями был предложен особый метод так называемого «калориметрического анализа», позволяющий определить количество тепла, поглощенное или отданное стенкой за целый период. [2]

Mulhouse, 1856 г. и Hirn. Memoire sur la theorie de la surchauffe dans les machines à vapeur. Тот же журнал, 1857 г. В этом же журнале за более поздние годы помещен ряд работ, принадлежащих сотрудникам Гирна Галлауеру (Hallayer), Лелутру (Leloutre) и др. Опыты эти использованы Гирном в его механической теории тепла (изд. 1875—1876 г.г. книга IV).

Опыты Кларка над паровыми машинами в Англии производились с 1851 г. Результаты их изложены в книге Кларка: Railway Machinery, London, 1851—1855 гг. Они изложены также в его позднейшей книге «The steam engine», London, 1889 г. Опыты Ишервуда над судовыми машинами изложены в очень редком издании: Yscherwood, «Experimental researches in steam engeneering». Philadelphia, 1863—1865.

[1] Обзор литературы до 1882 г. дан в статье проф. И. Тиме «Экономия топлива в паровых машинах в период двух столетий». Горн. журн., 1882 г. Много данных по этой и позднейшей эпохе приведено в курсе А. А. Радцига «Термодинамика». Киев, 1900/1901 гг., гл. XIII и XIV. Подробные библиографические сведения имеются также в книге Д. В. Яковлева «Расход пара как основание расчета паровой машины». Петербург, 1907 г. и в книге Dwelshauvers-Dery. «Etude calorimetrique de la machine à vapeur».

Развитие теории паровых машин характеризовано также в курсе В. И. Гракевецкого «Паровые машины», Москва, 1926.

[2] В первоначальном изложении теории калориметрического анализа у самого Гирна были неясности и даже ошибки. Точное изложение этой теории дано было Двельсгауверсом-Дери первоначально в статьях в журнале «Rev. univ. des mines», 1880 и 1882 гг., а также в позднейших статьях в журнале «Revue de Mécanique». 1897 г.— 1-е полугодие, стр. 7—21, и в вышецитированных статьях над влиянием сжатия и в книге «Étude calorimétrique de la machine à vapeur».

На русском языке изложение формул калориметрического анализа имеется, например, в вышецитированной статье А. А. Радцига в Вест. общ. технологов за 1897 г.

Изучение произведенных опытов в связи с их калориметрическим анализом позволяло сделать заключение о влиянии тех или иных факторов на величину этого обмена, а , следовательно, в частности, и на величину начальной конденсации и общего расхода пара. Для применения уравнений калориметрического анализа необходимо знать для какого-либо характерного момента работы пара в цилиндре состояние пара в нем, т. е. при работе насыщенным паром его давление и паросодержание. Давление пара может быть найдено по индикаторной диаграмме, относительно же паросодержания Гирн и его школа делали предположение, что пар является совершенно сухим в момент окончания выпуска и начала сжатия или предварения впуска свежего пара при отсутствии сжатия, как в ранних опытах Гирна и его школы.

Цейнер подверг критике основные положения теории Гирна и показал, что явления обмена могут быть до известной степени объяснены предположением присутствия воды во вредном пространстве машины к моменту начала сжатия. Между представителями школы Гирна и Цейнером возникла обширная полемика [1] (по остроумному выражению Гирна в одной из его статей: «борьба воды против железа» — «la lutte de l'eau contre le fer»). Полемика эта повела к большему уточнению положений школы Гирна и вызвала ряд новых глубоких исследований явлений теплообмена и конденсации пара при впуске.

Можно сказать, что в полемике этой проявилась борьба двух направлений исследования технических вопросов: дедуктивно-теоретического и индуктивно-экспериментального. Последнее несомненно заняло доминирующее место и стало рассматриваться во всех случаях как необходимый контроль всех теоретических выводов. Это стремление к экспериментальному исследованию распространилось на все области техники и в 80-х годах нашло себе благоприятную почву в основавшихся инженерных лабораториях при технических школах Соединенных Штатов и Англии, а несколько позже (90-е годы и начало XX столетия) — Германии, Франции, Бельгии и России. Исследования по паровым машинам, произведенные в этом периоде, можно разделить на два разряда: одни — чисто экспериментальные, выясняющие влияние тех или иных факторов на потребление пара. Исследования эти чрезвычайно многочисленны. Они использованы в том или ином объеме в больших курсах термодинамики паровых машин, особенно американских и английских. [2] Другие имели целью более глубокий

и в «Термодинамике» того же автора. Независимо от Двельсгауверса-Дери уравнения калориметрического анализа были выведены Грасгофом (Grashof) в «Untersuchungen der Dampfmaschinen». Z. d. VDI, 1883 г. и «Theoretische Maschinenlehre», III.

[1] Литература по этой полемике указана в вышеприведенной статье Тиме (Горн. журн., 1882 г.) и в книге Двельсгауверса-Дери «Étude calorimétrique»,а также в термодинамиках Цейнера и Гирна. Заметим, что в России одним из первых сторонников идей Гирна был И. А. Вышнеградский, проводивший их в своем преподавании в Петербургском технологическом институте в 60—70-х годах. См. В. Л. Кирпичев. «И. А. Вышнеградский как профессор и ученый». Вестн. общ. технологов, 1895.

[2] Thurston. A manual of the steam engine. New-York, 1891.

анализ явлений, происходящих в паровой машине.Сюда относятся прежде всего опыты Донкина [1] (Donkin) с аппаратом, названным им «ривилером», который представлял собой стеклянный цилиндр, соединяемый с внутренностью цилиндра паровой машины. На этом стеклянном цилиндре можно было наблюдать явления конденсации и испарения капелек воды в разные периоды работы пара в паровой машине. Эти опыты подтвердили, по крайней мере качественно, правильность воззрений школы Гирна. Большую важность имели также опыты с полным калориметрическим анализом многоцилиндровых машин, произведенные им в очень широком масштабе и с большой точностью. К числу этих лучших опытов относятся опыты Вилланса (Willans) над машинами его системы,[2] опыты Каллендара и Никольсона (Callendar and Nicolson), [3] опыты Шретера и Кооба (Schroeter und Koob) над машиной тендем системы Ван-ден Керхове [4] и многие другие, перечисленные в источниках, указанных в предыдущих ссылках.

Наряду с этими обширными опытами, идеи школы Гирна об интенсивном обмене тепла между паром и стенкой вызвали ряд исследований, пытавшихся подойти к этому вопросу, пользуясь уравнениями теории теплопередачи и распространения тепла. Из работ этого направления известностью пользуются труды немецкого исследователя Кирша (Kirsch) и французского инженера Надаля (Nadal). К этим работам примыкает и работа автора, в которой приведена обширная библиография предмета. [5] Более поздними работами являются диссертация Д. В. Яковлева [6] (произведенная в несколько другом направлении) и статья Белобродского.[7]

В связи с этим вопросом находятся также экспериментальные работы, имевшие целью найти изменение температуры в разных местах стенок цилиндра во время работы паровой машины. Одной из первых работ этого рода являлась работа Дюшена (Duchesne); [8] новейшая работа принадлежит Нэгелю (Naegel).[9]

Ewing. The steam engine, 2-е изд., 1897 г. Русск. пер.: Юинг «Паровая машина». Киев, 1901.

Perry. The steam engine, London, 1910 г.

Peabody. Thermodynamics of the steam engine. 4-е изд., 1898 г. Изложение результатов многочисленных опытов с паровыми машинами составляет также содержание III тома обширного труда проф. Гутермута: Gutermuth, Die Dampfmaschine, Berlin, 1928.

[1] Donkin. Proc. of the Inst. of Civ. engineers, 1889.

[2] Willans. Proc. of the Inst. of Civ. engin., 1888 и 1893 гг.

[3] Callendar and Nicolson. Proc. of the Inst. of Civ. engin., 1897 и 1898.

[4] Schroeter und Koob. Untersuchung einer von van der Kerhove gebauten Tandemmaschine von 250 P. S. Forschungsarb., Heft 19, 1904.

[5] А. А. Радциг. Математическая теория обмена тепла между паром и стенками цилиндра. Изв. Киевск. политехн. инст., 1903 г. и отдельное издание.

[6] Д. В. Яковлев. Расход пара как основание расчета паровой машины. Петербург, 1907.

[7] Белобродский. Потери теплообмена в цилиндрах паровых машин. Харбин, 1927.

[8] A. Duchesne. Rev. de mécanique, 1906 г. 2-е полуг., стр. 5.

[9] Naegel. Forschungsarb., Heft 300, 1928.

Из приведенного краткого обзора работ, вызванных доказанным фактом значительного влияния, которое оказывают явления обмена на работу пара в цилиндре, вытекают важные следствия относительно тех факторов, которые определяют расходы пара в паровой машине, а также относительно способов уменьшения этого расхода. Влияние начальной конденсации прежде всего сильно ограничивает выводы, которые можно сделать из чисто термодинамической теории паровой машины, не принимающей во внимание действия стенок цилиндра. Так,по этой последней теории следует, что при работе насыщенным паром давление впуска должно быть возможно высоким, а давление выпуска — возможно низким, так как при этом увеличивается коэффициент полезного действия как цикла Карно, так и Ренкина. Опыты же показывают, что при увеличении впускного давления выше известного предела начинает возрастать начальная конденсация пара, а, следовательно, и добавочный расход пара и это увеличение добавочного расхода пара может с избытком поглотить экономию расхода пара, даваемую более выгодным идеальным процессом. Так, например, в опытах Делафона [1] (Delafond) над одноцилиндровой машиной системы Корлисса в Крезо расход пара при давлении в 7 ата оказался больше, чем при 4,5 ата (при работе с конденсацией без паровой рубашки). В тесной связи с этим вопросом находится также вопрос о наивыгоднейшей степени наполнения: теоретически — расширение должно быть полным; но при этом продолжительном расширении стенки цилиндра охлаждаются больше, а потому начальная конденсация тоже увеличивается; поэтому для каждого давления имеется наивыгоднейшая степень наполнения (что показали еще опыты Ишервуда).

Мы говорили уже, как усложняется вследствие влияния стенок вопрос о влиянии величины сжатия пара. Все эти обстоятельства заставляли искать способов для уменьшения влияния стенок цилиндра и величины начальной конденсации. Таким средством явились прежде всего уже известные из предыдущей практики в постройке паровых машин способы: применение паровой рубашки и расширения пара во многих цилиндрах. Паровая рубашка, предложенная Уаттом, позже стала вызывать возражения, так как внешняя поверхность высшего охлаждения при ней увеличивается, а действие ее на нагревание стенок цилиндра и уменьшение начальной конденсации не было понятно до тех пор, пока Гирн не доказал его прямыми опытами в 1856 г. Затем этот вопрос подвергался много раз опытному исследованию (опыты Донкина, Делафона, Ишервуда в американских инженерных лабораториях и др.) и применение ее во всех этих опытах (с насыщенным паром) давало заметную экономию в расходе пара и позволяло применять с выгодой меньшие степени наполнения. Поэтому применение паровой рубашки в машинах, работающих насыщенным паром, сделалось повсеместным, хотя особенно заметная экономия от применения паровой рубашки получалась

[1] Delafond. Annales des mines, 1884.

в машинах малых размеров, крупные же машины давали значительно меньшую экономию.

Применение расширения не в одном цилиндре, а в двух или трех, с точки зрения чисто термодинамической теории является безразличным. Скорее можно при применении нескольких цилиндров ожидать даже больших потерь вследствие перехода пара из одного цилиндра в другой. Между тем, согласно взглядам школы Гирна, применение расширения в нескольких цилиндрах уменьшает разность температур в первом цилиндре, а, следовательно, и начальную конденсацию в нем; таким образом, применение многоцилиндровых машин должно приносить заметную экономию пара. Оно позволяет с выгодой применять высокое давление и большое расширение пара. Это заключение вполне подтверждается прямыми опытами Вилланса (о которых мы уже говорили) с машиной, могущей работать с расширением пара в одном, двух или трех цилиндрах. То же самое подтвердили и опыты с экспериментальными машинами в корнельском и массачузетском институтах, произведенные в 90-е годы и другие опыты. [1]

Наконец, выяснено было и значение перегрева пара: применение небольших степеней перегрева чисто теоретически дает небольшое повышение коэффициента полезного действия паровой машины. Между тем, опыты Гирна над применением перегрева (произведенные в 1857 г.) показали значительную экономию вследствие применения такого пара; к тому же заключению приводят и некоторые опыты Ишервуда и других исследователей. Объяснением этой большой экономии здесь тоже является уменьшение начальной конденсации при применении перегретого пара.

Влиянием обмена тепла можно было объяснить и другие явления. Так, например, начальная конденсация пара должна уменьшаться при увеличении числа оборотов данной машины (так как при каждом впуске пара получается меньше времени на охлаждающее действие стенок). Опыты Вилланса, произведенные с машиной, допускавшей изменение числа оборотов в широких пределах, подтвердили это заключение и даже установили приблизительную зависимость добавочного расхода на начальную конденсацию от числа оборотов (или средней скорости поршня), как обратно пропорциональную корню квадратному из числа оборотов (или из средней скорости поршня). Эта зависимость получилась и в теоретических выводах Кирша относительно явлений обмена тепла в цилиндре.

Наконец, та же теория Гирна объясняет влияние самой конструкции цилиндра на расход пара: для уменьшения добавочного расхода пара должны быть возможно уменьшаемы величины объема и поверхности вредного пространства, что достигается в клапанных и особенно — в кранных парораспределениях. При этих же распределениях должно полезно действовать разделение путей для впуска и выпуска пара, так как при этом

---

[1] Peabody. Thermodynamics, гл. XV.

разделении свежий пар проходит через поверхности менее охлажденные, чем в случае применения одного и того же канала для впуска и выпуска пара.

Мы видим, что термодинамическая и экспериментальная теории дали в совокупности богатейший материал для оценки конструкций паровых машин с точки зрения их экономичности. Поэтому требование со стороны промышленности паровых машин, работающих экономично, могли быть с успехом исполнены во второй половине XIX века, характеризуемой крупнейшими достижениями в области постройки паровых машин. К описанию этого периода мы переходим в следующей главе.

Глава III

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПАРОВОЙ МАШИНЫ В ПОСЛЕДНЕЙ ТРЕТИ XIX И В НАЧАЛЕ XX СТОЛЕТИЙ

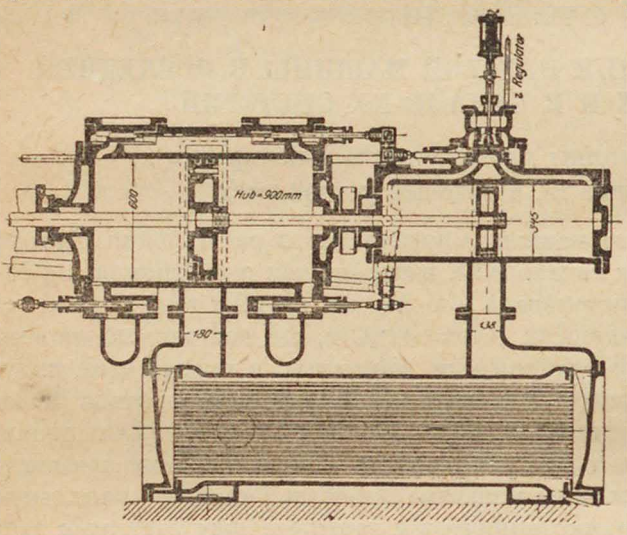
Паровые машины многократного расширения Применение их в судовых устройствах

Мы говорили уже, что машины многократного расширения Вульфа предложены были в самом начале XIX века, причем они строились с балансиром. Эти машины применялись и позже до 50—60-х годов прошлого столетия при больших мощностях, в тех случаях, где дело шло об экономной работе и о хорошем регулировании, например, в текстильной индустрии. Но в начале 60-х годов возникает стремление освободиться от балансира и перейти к прямодействующим машинам двойного расширения, горизонтальным и вертикальным. Выгодность машин двойного расширения в тепловом отношении была показана опытами Гирна, а правильные соотношения между объемами цилиндров и вообще между главными данными намечены были в книге по паровым машинам Ренкина, который дал способ комбинирования диаграмм машин многократного расширения и в настоящее время называемый «ренкинизированием». Первоначально и прямодействующие горизонтальные машины двойного расширения строились по типу машин Вульфа, т. е. с двумя цилиндрами, помещенными рядом с параллельным движением поршней, действующими иногда на одну общую траверзу, которая соединялась с одной шатунно-кривошипной передачей. Только позже стали применяться конструкции машины с двумя цилиндрами, помещенными друг за другом (машины тандем). Замечательным примером такой конструкции раннего времени является машина завода Зульцера постройки 1865 г.; разрез ее по цилиндрам изображен на фиг. 110.

Эта машина замечательна еще в том отношении, что имеет обогреваемый паром ресивер, тогда как опыты применения промежуточного перегрева пара проведены были только в начале 900-х годов.

Но, несмотря на выясненность преимуществ двойного расширения, его применение в стационарных машинах распространялось медленно. Заметное распространение его в области стационарных машин относится к 80-м годам прошлого столетия, причем решающими в этом отношении явились успехи таких машин в судостроении. Эта ведущая роль судовых

машин в отношении применения экономических усовершенствований паровых машин совершенно понятна, так как экономия пара и топлива имеет в судовых машинах еще большее значение, чем в стационарных машинах: кроме непосредственного значения, которое велико, так как судовые машины отличаются большой мощностью и интенсивностью использования, всякое сбережение топлива уменьшает необходимый его запас для данного переезда, а, следовательно, дает возможность увеличить количество полезного груза, что чрезвычайно важно для коммерческих судов; для военных же судов возможно за счет уменьшения запаса угля увеличивать вооружение или количество боевых запасов или, наконец, радиус действия.



Фиг. 110

Развитие пароходных машин с двадцатых до начала шестидесятых годов характеризуется чрезвычайным разнообразием конструкций: [1] в первом периоде построения пароходных машин они строились балансирными, но затем стали применяться (еще при колесных пароходах) разнообразные конструкции прямодействующих машин с наклонными цилиндрами и с качающимися цилиндрами. После введения гребного винта в сороковых годах прошлого столетия, в связи с деятельностью инженера Смита (Smith) в Англии и Эриксона в Америке, в этих пароходах стали применяться сначала те же конструкции, что и в колесных пароходах, причем в этих машинах устраивалась зубчатая или цепная передача к гребному винту. Для увеличения мощности такие машины делали спаренными двух- или даже четырехцилиндровыми. Вертикальные машины с цилиндрами наверху (т. е. такой конструкции, которая в настоящее время исключительно применяется в судостроении) стали строиться инженером Кэрдом (Caird) только в конце 40-х годов. В 50-х и 60-х годах конструкция эта начинает вытеснять все прочие.

Слабой стороной судовых машин являлось применяемое в них долгое время низкое давление: еще в 40-х годах прошлого столетия в этих машинах применялись давления порядка 1,17 до 1,25 атм., в то время как в Корнваллийских машинах применялись давления до 3 ата. Применение более высоких давлений в пароходных машинах долгое время считалось

[1] На котором мы не можем подробно останавливаться за недостатком места.

опасным из-за ряда происходивших в котлах более высокого давления несчастных случаев. Кроме того, значительному повышению давления мешало применение конденсаторов смешения. При этих конденсаторах соленая морская охлаждающая вода смешивалась с конденсатом и эта смесь шла на питание котлов. Эта смесь содержит около 3% солей, которые при температуре в 144° делаются нерастворимыми и выделяются из раствора, осаждаясь на стенках котлов. Для избежания этого явления, чрезвычайно вредно отражающегося на котлах, температура в котлах не должна была превышать той температуры, которая соответствует приблизительно давлению в 3 ата; это давление и являлось предельным для судовых машин. Кроме того, присутствие солей, хотя бы и растворенных, в питательной воде само по себе представляло большое неудобство и поэтому первым шагом к усовершенствованию судовых машин являлось введение в них поверхностных конденсаторов (что содействовало и улучшению вакуума). Такие конденсаторы предлагались для судовых машин Эриксоном (в 1829—1830 г.) и Галлем (Hall — патент № 6556, 1834 г.).

Но эти предложения успеха не имели и только в 60-х годах прошлого столетия английским инженерам Гемфри (Humphrey) и Спенсеру (Spencer), а затем Кэрду (Caird) удалось ввести их в употребление.

Применение поверхностных конденсаторов позволило повысить давление в судовых машинах и оно стало постепенно подыматься до 5—7 атм. Но выгодное применение этих давлений и в еще большей степени более высоких давлений требовало работы пара в машинах двойного расширения. [1]

Машины двойного расширения предлагались в области судостроения гораздо раньше, еще в 30-х годах прошлого столетия. Предложение это сделано было немецким инженером Моритцом Рентгеном (Moritz Roentgen), работавшим в то время в Голландии; [2] он предложил в 1829 г. перестройку судовых машин для пароходов «Геркулес» и «Джемс Уатт» на машины двойного расширения. При этом он отказался от типа машин Вульфа (предлагавшихся иногда для пароходов) в виду их неудобств и создал тип компоунд с двумя цилиндрами, с самостоятельными шатунно-кривошипными передачами и кривошипами под углом в 90°. Машина Рентгена для парохода «Геркулес» с горизонтальным и вертикальным цилиндрами изображена на фиг. 111.

Во Франции патент на машины компоунд был взят по поручению Рентгена эльзасским машиностроителем Кехлином (Koechlin).

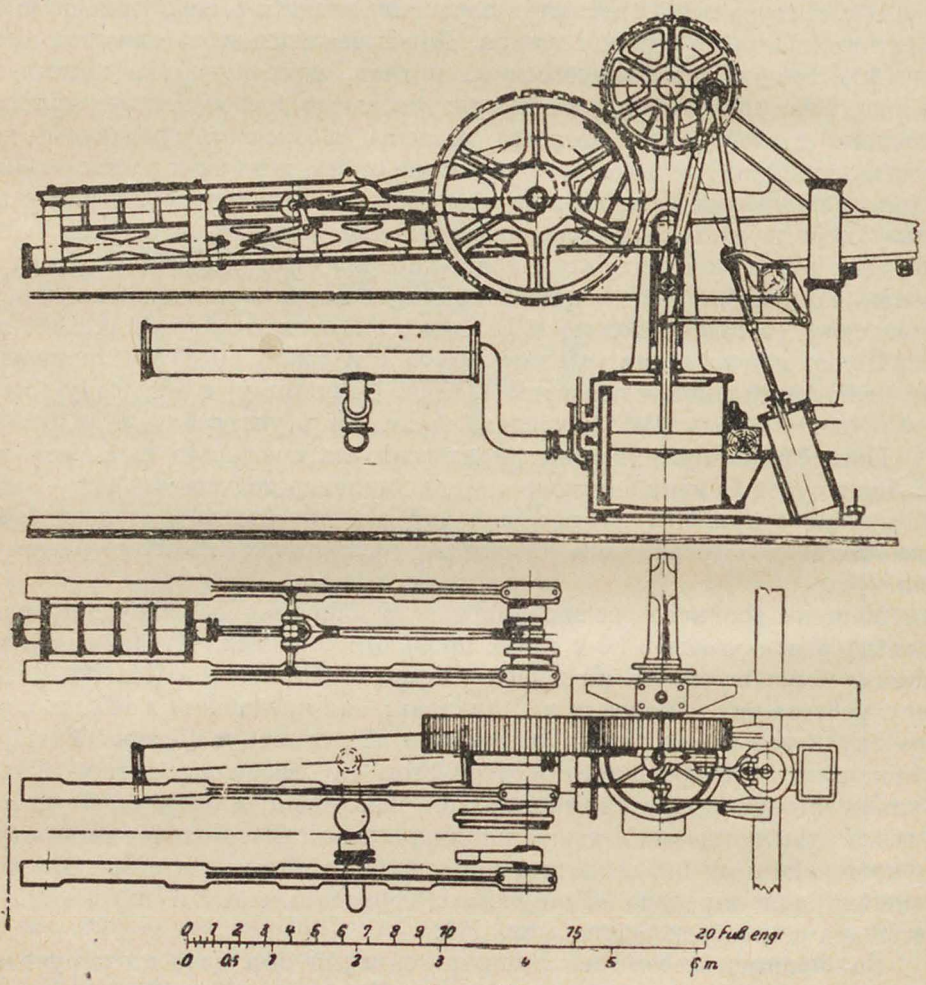
Хотя Рентген и дальше продолжал с успехом строить машины компоунд для пароходов, но особенного успеха они не могли иметь, так как тогда применялось еще невысокое давление.

---

[1] Этот период развития судовых паровых машин хорошо изложен в статьях крупного деятеля в области германского судостроения, инженера Буслея (Busley) в «Z. d. VDI» в 1888, 1891 и 1892 гг.

[2] Сведения о деятельности Рентгена помещены были в статьях Brückmann, Z. d. VDI, 1892 и 1893 гг. и в журнале «Engineer», 1890 г., 1-я половина.

С повышением давления в пароходных машинах в 60-х годах интерес к машинам двойного расширения чрезвычайно возрос; тип компоунд, предложенный Рентгеном, при вертикальных судовых машинах оказался чрезвычайно удобным и судовые вертикальные двухцилиндровые машины стали быстро распространяться. Одним из главных деятелей в этой обла-

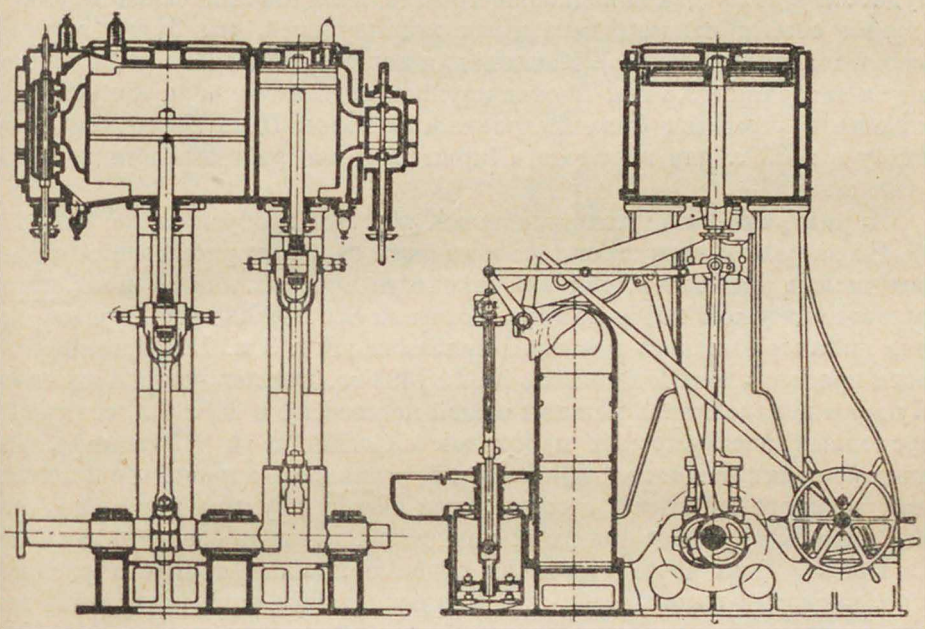


Фиг. 111

сти был английский инженер Джон Эльдер (John Elder), который начал свою деятельность еще в середине 50-х годов, но окончательный успех имел к концу 60-х годов прошлого столетия. Но даже и позже этой эпохи особенно консервативные инженерные круги долго противились введению компоунд-машин. Так, Английское адмиралтейство еще в 1875 г. дало золотую медаль за сочинение, в котором доказывалось преимущество сдвоенных судовых машин над компоунд-машинами, хотя прямые сравнительные опыты американского инженера Эмери (в 1874 г.) над кораблями,

снабженными компоунд-машинами и простыми машинами, показали значительное преимущество первых. [1] Только с 1876 г. начинается введение компоунд-машин в английском военном флоте, а затем и в военных флотах других держав. Для примера приводим одну из конструкций судовых машин компоунд 70-х годов (фиг. 112).

Давления в судовых компоунд-машинах подымались постепенно от 5 до 8 ата. Расход угля при применении компоунд-машин понизился до 0,9 кг на индикаторную л. с. ч. Мощности машин вместе с увеличением пароходов стали тоже возрастать и достигают в конце 70-х и в 80-х годах порядка 3000—5000 л. с., что вызвало необходимость строить машины



Фиг. 112

двойного расширения не двух-, а трехцилиндровыми: цилиндр низкого давления делится на два, так как один выходил бы при необходимом размере слишком большим.

Естественно, что развитие судовых паровых машин не остановилось на этом промежуточном типе: при дальнейшем увеличении давления до 10—12 ата сделан был переход к машинам тройного расширения. Для судовых машин большое значение имели опыты Кеннеди (Kennedy): в опытах с машиной тройного расширения на корабле «Иона» в 650 л. с. он получил чрезвычайно благоприятный результат: при давлении пара около 12,5 ата получился расход пара, равный 6 кг и расход угля в 0,67 кг

[1] Результаты опытов Эмери приведены в термодинамике Пибоди: P e a b o d y, «Thermodynamics of the steam engine», 4-th edition, New-York, 1898 г., стр. 386 и след.

на индикаторную л. с. ч. [1] Но самое построение судовых машин тройного расширения началось раньше и находится в связи с экономическим кризисом середины 70-х годов. Кризис этот вызвал большое понижение фрахтов и судовым компаниям для сохранения прибылей пришлось заботиться о понижении эксплоатационных расходов, что и вызвало попытки постройки машины тройного расширения.

В 1881 г. английский инженер Кирк (Alexander Kirk) построил на заводе Нэпира (Napier and Sons) первую машину тройного расширения для парохода «Абердин». Для такой машины нужно было сравнительно высокое давление, осуществление которого в паровых котлах встретило трудности в нахождении подходящего материала (об этой связи котельной техники с материалами, даваемыми металлургией, мы будем говорить в соответствующем отделе). Машина для корабля «Абердин» была построена для давления в 9,8 ата. Первая крупная судовая машина тройного расширения в Германии была построена инженером Цизе (Ziese) на заводе Шихау в 1883 г. для парохода «Нирштейн»; она работала при давлении в 11 ата.

Нормальный тип трехцилиндровой машины изображен на фиг. 113.

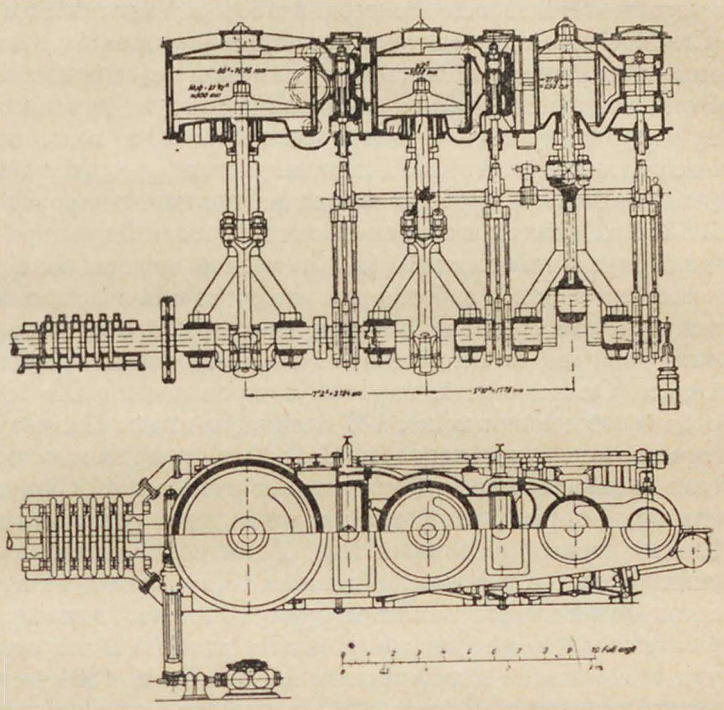
Но на ряду с этим строились и машины тройного расширения с большим числом цилиндров, так как мощности судовых машин продолжали возрастать и уже в 1886—1887 г. достигали 8000—9000 л. с., причем диаметр цилиндра низкого давления приближался к 3 м. Возрастание мощности продолжалось и дальше: в 1892 и 1893 гг. для пароходной компании «Кунард» понадобились машины общей мощностью в 25 000 л. с. (для быстроходных пассажирских пароходов «Кампания» и «Лукания»). Для таких больших мощностей применяли 5-цилиндровые машины с 2 цилиндрами высокого давления, помещенными сверху двух же цилиндров низкого давления, между которыми помещался цилиндр среднего давления.

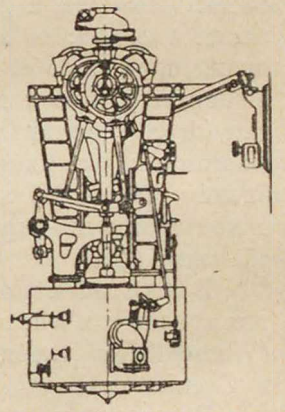
Позже стали часто строиться судовые машины тройного расширения с четырьмя цилиндрами, помещенными рядом, причем цилиндр низкого давления был разделен на два. Такая конструкция оказалась очень удобной для уравновешения движущихся масс по способу Шлика (Schlick),[2] предложенному в 1893 г. Согласно этому выбираются углы заклинения кривошипов, не равные 90°, а также выбираются расстояния между цилиндрами, соответствующие условиям уравновешения. По этой системе построены были многие быстроходные пассажирские суда, (например, пароход «Император Вильгельм великий») с двумя 4-цилиндровыми машинами общей мощностью в 28 000 л. с., при диаметре цилиндров низкого давления, равном 2 459 мм и ходе поршня, равном 1 750 мм. Машины эти построены были на заводе «Вулкан» в 1897 г. Эти машины применялись также обыкновенно на линейных военных судах додредноутского типа.

[1] Отчеты об опытах Кеннеди помещались в журнале «Proc. of the Inst. of Mecan. Engine» с 1889 по 1892 г.

[2] Способ Шлика (Schlik) вызвал большую литературу. Описание способа Шлика и подробная библиография приведены в книге Лоренца «Dynamik der Kurbelgetriebe», Leipzig, 1900.

Последним этапом в развитии судовых машин было предложение машин четверного расширения. Сбережение, даваемое при переходе к машинам четверного расширения от машин тройного расширения меньше, чем при переходе от машин компоунд к машинам тройного расширения. Поэтому машины четверного расширения строились, главным образом, очень крупных мощностей, причем число цилиндров и при тройном расширении было бы большим. Примером машин четверного расширения являются машины парохода «Deutschland» (1900 г.), имевшего 2 машины, каждая по 17500 л. с. Каждая из этих машин имела по 6 цилиндров: 2 одинаковых цилиндра высокого давления, помещенных сверху цилиндров низкого давления (диаметром по 930 мм), 2 цилиндра низкого давления (диаметром по 2 700 мм) и 2 цилиндра среднего давления, помещенных между цилиндрами низкого давления, один диаметром 1870 мм, другой — диаметром 2640 мм. Общий ход поршня равнялся 1 850 мм. Давление пара было равно 16 ата. Четырехколенчатый вал из никелевой стали имел внешний диаметр 635 мм и диаметр внутренней проточки —255 мм; общий вес его — 101 400 кг. Машины эти принадлежат к числу самых больших поршневых машин, когда-либо построенных.





Фиг. 113

Возвращаясь к стационарным машинам, надо сказать, что в этой области применение машин тройного расширения относится к более поздней эпохе — середине 80-х годов и особенно — к 90-м годам прошлого столетия в связи с требованиями крупных электрических станций и мы будем говорить о них особо.

Нам остается еще сказать о введении двойного расширения в паровозные машины. Проекты применения системы компоунд в паровозах появляются очень рано: о выгодности таких паровозов писал во французском патенте еще Рентген в 1834 г.; английский патент Краддока (Craddock) на одну систему компоунд-паровоза был взят в 1846 г., в Соединенных Штатах имелись патенты компоунд-паровозов 1867, 1870 и 1871гг. Но настоящая борьба за введение компоунд-паровозов в железнодорожную практику начинается с середины 70-х годов прошлого столетия. Инициатором этого введения является французский инженер Маллет (Anatole Mallet). Первый патент на компоунд-паровоз взят был в 1874 г. В 1876 г. Маллетом был построен на заводе Шнейдера в Крезо компоунд-паровоз танкового типа для железной дороги Байонна-Биарриц. Этот компоунд-паровоз работал при давлении в 11 ата, цилиндров было два: цилиндр высокого давления имел диаметр 240 мм, цилиндр низкого давления —400 мм; ход поршня 400 мм. Паровоз был небольших размеров — 19,5 м. Опыты с этим паровозом, произведенные в 1876 г., обратили на себя всеобщее внимание. [1] В ближайшие годы Маллет продолжал усовершенствовать свой паровоз. С 1880 г. вопросом о паровозах компоунд стал заниматься другой крупный деятель в этой области, немецкий инженер фон-Боррис (von Borries) и в том же году им был построен на заводе Шихау первый небольшой тендер-локомотив системы компоунд. Удачные опыты с этим локомотивом (давшим 16,5% экономии в расходе угля) побудили фон-Борриса заняться этим вопросом дальше, и в 1882 г. им был построен на заводе Геншеля товарный паровоз системы компоунд с давлением пара, равным 14 ата, а в 1884 — пассажирский компоунд-паровоз. Некоторые трудности представлял для паровозов систем Маллета и фон-Боррис (т. е. с двумя цилиндрами) момент трогания с места: в этот момент паровоз должен был работать со впуском пара в оба цилиндра, так как работая только со впуском в цилиндр высокого давления, при мертвом положении кривошипа для этого цилиндра, паровоз вообще не мог был двинуться с места. Поэтому в указанных системах приходилось иметь особые приспособления (краны Маллета и фон-Борриса), которые превращали при пуске в ход компоунд-паровоз в обыкновенный паровоз, пуская пар сразу в оба цилиндра.

В 80-х годах компоунд-паровозы начинают распространяться и в других странах: в Англии в этой области работали Вебб (Webb) и Ворзделль (Worsdell), в Америке первый компоунд-паровоз построен был заводом в Скенектеди.

Во второй половине 80-х годов и в позднейшие годы стали строиться 4-цилиндровые компоунд-паровозы различных конструкций (де-Глена, Вебба, фон-Борриса и др.). Рассмотрение этих конструкций выходит за рамки настоящего сочинения.

---

[1] Статьи Маллета и отчеты об опытах с его паровозом опубликованы в журнале «Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France» за 1876—1877 гг.

Применение перегретого пара в паровых машинах

Перегрев пара предлагался много раз для применения в паровых машинах, начиная еще с XVIII столетия. Из этих многочисленных попыток можно отметить только две: одну, принадлежащую Перкинсу и связанную с применением в его машинах пара высокого давления и другую — В. Сименса, в которой предлагалось применение регенератора.

Попытка Перкинса связана была с его способом получения пара высокого давления. Но перегретый пар, пущенный в машину Перкинса, быстро делал негодной пеньковую набивку поршня и поэтому в дальнейшем Перкинс предлагал впрыскивать в этот перегретый пар воду, называя такой пар «совершенным». Это впрыскивание воды представляло в сущности отказ от перегретого пара.

В. Сименс предлагал применять смешивание свежего перегретого пара с отработанным паром, подвергнутым нагреванию в регенераторе. Сама машина Сименса состояла из двух цилиндров простого действия, что делало ненужным сальник для поршня и облегчало применение перегретого пара, но неправильность применения уже отработавшего пара с новым его подогревом, а также практические трудности смазки и вообще неразработанность конструкции не позволили машинам Сименса (представленным на выставке в Париже 1855 г.) войти в практику. Серьезное изучение вопроса о применении перегретого пара в паровых машинах, имеющее практическое значение, произведено было в конце 50-х годов Ишервудом в Соединенных Штатах и Гирном во Франции. В области судовых машин перегрев усиленно пропагандировался также известным английским инженером Пенном еще в 1859 г. [1] Пенн указывал на вредное влияние присутствия воды в цилиндре паровой машины. Эта вода может быть удалена из пара только помощью перегрева. Пенн рекомендовал такой умеренный перегрев, который бы позволил пару остаться сухим за все время впуска и расширения, несмотря на охлаждающее действие стенок. Для этой цели он считал достаточным перегрев на 100° F(~55° C), что при давлении пара в тогдашних судовых машинах, равном 2,4 ата, дает температуру впуска, равную 183°, т. е. такую, которая уже достигалась в то время в паровозах, работавших насыщенным паром при 8—9 ата; поэтому Пенн думал, что введение такого умеренного перегрева в судовых машинах не вызовет больших практических затруднений.

Однако, несмотря на доказанную экономичность применения перегретого пара в судовых машинах, Пенну не удалось провести его применение в широких размерах.

Опыты Ишервуда (о которых мы уже упоминали) производились в начале 60-х годов. Эти опыты тоже показали значительную экономию от применения перегретого пара. Так, например, в опытах на пароходе «Eutow», при применении перегретого пара с давлением в 2,9 ата,

---

[1] Penn, Proc. of the Inst. of Mech. Engin., стр. 185, 1859.

с температурой в 200° С (т. е. с перегревом на 60° С) получилась экономия в расходе пара на 18% и в расходе угля — на 15%. [1]

Однако и попытки Ишервуда ввести перегретый пар в употребление в судовых машинах тоже потерпели неудачу вследствие разного рода практических трудностей, [2] и вопрос этот был надолго снят с судовой практики, несмотря на громадные успехи, которые делало применение перегретого пара в конце 90-х годов и в начале XX столетия в практике стационарных паровых машин и турбин, а также паровозов.

Обратимся теперь к стационарным машинам. В этой области мы уже указывали на значение опытов Гирна, произведенных в 1857 г. Эти опыты не только показали выгодность применения перегретого пара в паровых машинах, но объяснили причину меньшего расхода пара при применении его с перегревом. Его отзыв о перегретом паре является точным предсказанием будущего: «в более или менее близком будущем, когда в технической механике здравый дух прогресса восторжествует над рутиной, перегретый пар заменит несомненно насыщенный везде, где дело будет итти о получении дешевой энергии».

Замечательно, что также благоприятно отзывается о будущности перегретого пара Цейнер, являющийся во многих вопросах убежденным противником взглядов Гирна. Во 2-м издании своей «Термодинамики» (1866 г.) он говорит о применении перегретого пара следующее: «наблюдения и опыты (между которыми высшее место занимают известные прекрасные опыты Гирна) показывают, что паровые машины с перегретым паром будут все более и более применяться в виду тех выгод, которые они представляют в отношении расхода топлива». [3]

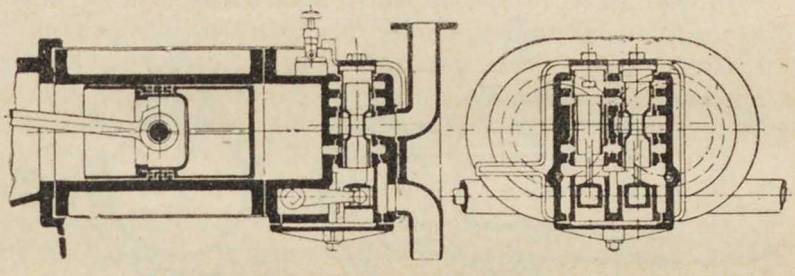
Однако, эти предсказания Гирна и Цейнера не скоро получили свое осуществление. Трудности встретились в самих перегревателях, не дававших должного перегрева и не выносивших долго высокой температуры горячих газов, применяемых для перегрева. Машины, работавшие с перегретым паром, тоже не были к нему вполне приспособлены: смазочные масла органического происхождения (применявшиеся тогда в паровых машинах) и набивка сальников не выносили высокой температуры перегретого пара, вследствие чего начиналось заедание поверхности цилиндра и штока поршня. В общем, только некоторые фирмы продолжали применять невысоко перегретый пар. Так делал, как мы видели, завод Зульцера и некоторые сторонники взглядов Гирна в Эльзасе. Из них следует упомянуть о Шверере (Schwoerer), выработавшем в 80-х годах хороший тип перегревателя с чугунными ребристыми трубами, подходящий для получения умеренного перегретого пара. Распространению установок с умеренно перегретым паром в Эльзасе оказал также большое содействие Вальтер Менье (Walther Meunier), директор Общества по надзору за паровыми котлами в Мюльгаузене. В Германии сторонником перегретого

[1] Peabody. Thermodynamics, стр. 369—370.

[2] Трудности смазки, набивка сальников, перегорание перегревателей и др.

[3] G. Zeuner. Technische Thermodynamik, стр. 545, изд. 1866.

пара является проф. Шретер (Schroeter), показавший в опыте, произведенном в 1891 г. с машиной тройного расширения Аугсбургского завода, выгодность применения такого пара. [1] В этом опыте при перегреве до 230° (при давлении пара равном 7,3 ата) получилась экономия в расходе пара, равная 9%. К этому времени вопросы смазки и набивки сальников получили уже удовлетворительное разрешение. Однако, эволюция в области применения перегретого пара шла очень медленно, так как заводы были заняты в этих годы другими усовершенствованиями: увеличением мощности машин, применением высокого давления и конструкцией трех-



Фиг. 114

цилиндровых машин, а также разными усовершенствованиями существовавших конструкций. Но в это медленное развитие внезапно внесено было, поразившее технической мир, необыкновенно смелое предложение немецкого машиностроителя, Вильгельма Шмидта (Wilhelm Schmidt).[2] Вместо применявшихся перегревов максимум до 250°, он предложил применять пар температурой в 350°. Его первое предложение было сделано в 1892 г. Как котел, так и машина представляли интересные особенности. [3] В частности, машины строились им первоначально в виде сдвоенных машин простого действия, чтобы избежать трудностей устройства сальника. Разрез по цилиндру такой машины изображен на фиг. 114.

Распределение делается в этой машине поршневым золотником, помещенным в головке цилиндра. Машины Шмидта этого типа строились сначала очень малой мощности: 2—10 л. с., но затем стали строиться и больших мощностей — до 100 л. с.

---

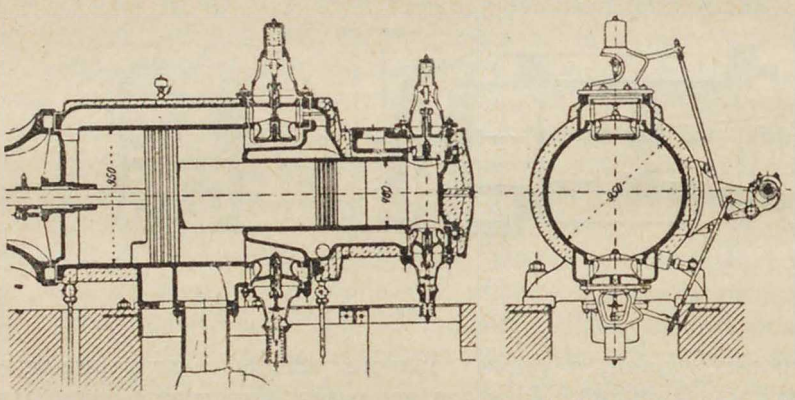
[1] M. Schroeter, Z. d. VDI, 1891.

[2] В. Шмидт (1868—1924 гг.) имел только низшее техническое образование, но в виду своих выдающихся заслуг в области паровых машин получил почетное звание доктора-инженера. Он находился в близких отношениях с профессорами Цейнером и Левицким. Краткие биографические сведения о нем помещены в его некрологе, написанном автором настоящей книги: «Технико-экономический вестник», № 6, 1924. О заслугах В. Шмидта по введению паров высокого давления (60 атмосфер) мы будем говорить позже.

[3] Сведения об этих ранних машинах Шмидта имеются в статьях Гутермута (Gutermuth) Z. d. VDI, 1896 и Шретера, Z. d. VDI, 1895. На русском языке описание этих ранних устройств машин и котла Шмидта дано в статье: А. А. Радциг. «Механическая лаборатория Дрезденского политехникума». Вестн. общ. технологов, 1897.

Другой тип машины Шмидта был тендем с соединенными цилиндрами, ступенчатым поршнем и клапанным парораспределением. Он изображен на фиг. 115. Этот тип был предложен в 1894 г. Машины этого типа при небольших мощностях (60—120 л. с.) показали необыкновенно малый расход пара. Так, машина в 123 л. с., работавшая при давлении в 11,5 ата и 350°, дала расход пара в 4,44 кг пара на индикаторную л. с. ч. [1]

Другая машина Шмидта несколько большой мощности (257,6 л. с.), испытанная проф. Левицким (Levicki), дала расход пара, равный 4,076 кг на индикаторную л. с. ч., а при других опытах даже 3,835 кг.



Фиг. 115

Эти цифры потребления пара, с трудом достигаемые даже лучшими и самыми большими паровыми машинами, вызвали к себе вначале даже некоторое недоверие. [2] С другой стороны, этот малый расход в машинах небольшой мощности вызвал надежды на использование этих машин в мелкой промышленности и на поддержку ими этой промышленности в борьбе ее с крупным капиталом. С подобного рода мнениями мы встретимся также при изложении истории развития двигателей внутреннего сгорания и там коснемся их подробнее. Относительно машин Шмидта это мнение высказывалось известным реакционным публицистом Максимилианом Гарденом (сторонником Бисмарка и противником социал-демократов). Как и в случае двигателей внутреннего сгорания, надежды эти не оправдались и высокий перегрев пошел на пользу той же крупной промышленности и крупному капиталу. Для этого необходимым шагом являлось распространение применения перегретого пара на паровые машины обыкновенных конструкций (с необходимыми конструктивными изменениями).

Задача эта была поставлена и разрешена рядом немецких заводов, прежде всего заводом «Dingler'sche Maschinen-Fabrik», в работе которой

[1] Ztschr. des Bayr. Damk. Vereins, № 11, 1897.

[2] Это недоверие высказывается, например, у Пибоди: «Thermodynamics», стр. 377.

принимал участие известный специалист по паровым машинам проф. Дёрфель (Doerfel). Этот завод уже в 1896 г. стал строить машины обыкновенной конструкции, работающие перегретым паром с температурой до 300°. [1]

По тому же пути пошли и другие заводы. Применение перегретого пара повлияло на конструкцию паровых машин, главным образом, в следующих отношениях: во-первых, цилиндры стали делаться без паровой рубашки, так как сложные отливки цилиндров с паровыми рубашками давали трещины, да и экономия от паровой рубашки при перегретом паре делалась весьма незначительной; во-вторых — из парораспределительных органов оказались пригодными цилиндрические золотники и клапаны, плоские же золотники и краны оказались малопригодными; неудобными оказались также и двойные золотники Ридера и Мейера; в-третьих — введены были металлические и асбестовые набивки для сальников поршневых штоков. В более позднем периоде при высоко перегретом паре стали отказываться от тройного расширения и для очень больших машин перешли к постройке сдвоенных тендем-машин. К локомобилям с высокоперегретым паром мы вернемся впоследствии. Теперь же нам надо сказать о другом крупнейшем достижении В. Шмидта — введении высоко перегретого пара в паровозную практику. Усовершенствования в паровозах вообще прививаются с большим трудом, чем в стационарных (и даже в судовых машинах): в паровозах приходится считаться с ограниченным весом, габаритом и в особенности — с очень трудными условиями эксплоатации и требованиями большой надежности в работе. Поэтому многие усовершенствования, принятые в стационарных машинах, не вошли в широкое употребление в паровозных машинах, хотя и предлагались для них, например, двойные золотники, клапанные парораспределения и т. п. Первая попытка применения перегретого пара в паровозах относится к 1849 г. и сделана была французским инженером Моншейлем (Jean de Montcheuil) на паровозах железной дороги Troyes-Montereau. [2] Перегреватель Моншейля (французский патент 3/VII и 9/VIII 1849 г.) состоял из U -образных трубок, помещенных в уширенных дымогарных трубах. Каких-либо сведений о работе паровозов с этими перегревателями не имеется.

Первые паровозы В. Шмидта для работы перегретым паром были изготовлены в 1898 г. на заводах «Вулкан» и Геншеля в Касселе. Перегреватель в этом паровозе был помещен в огневой трубе, но эта конструкция сразу же оказалась неудовлетворительной и в следующем же году Шмидт перешел к системе перегревателя, помещенного в дымовой коробке, представлявшего собой ряд согнутых в кольцо трубок. Паровоз этой системы, построенный на заводе Борзига, получил на всемирной выставке в Париже в 1900 г. высшую награду.

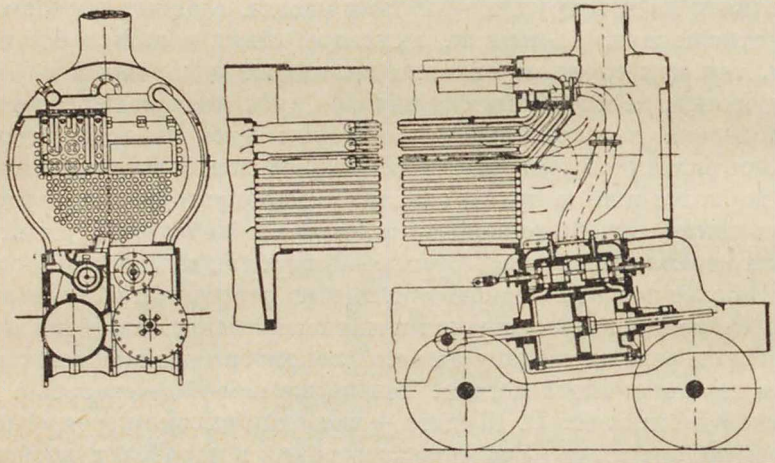
Но и этот тип перегревателя не явился окончательным, хотя с ним было построено в Германии довольно много паровозов. Чистка этого

---

[1] R. Doerfel, Z. d. VDI, стр. 601, 1899.

[2] The Engineer, стр. 416—417, 1910.

перегревателя представляла большие неудобства и трубы его сильно горели. Поэтому уже в 1903 г. Шмидт перешел к постройке перегревателей нового типа, состоящих из U-образных элементов, помещенных в дымогарных трубах увеличенного диаметра. Разрез дымовой коробки с таким перегревателем показан на фиг. 116.



Фиг. 116

Температура пара в этих перегревателях достигалась порядка 300°.

Паровозы с перегревателями Шмидта получили чрезвычайно большое распространение во всех странах, хотя после перегревателей Шмидта было предложено много других систем: Пилока, Слуцкого, Ноткина и др. [1] Так, например, пароперегреватель Шмидта поставлен на одном из самых больших довоенных паровозов, построенном заводом Болдвина в Соединенных Штатах. [2]

В. Шмидту пришлось выработать для паровозов с перегретым паром не только конструкцию перегревателей, но и цилиндров и распределительных органов. Для последней цели служит поршневой золотник, изображение которого видно на фиг. 117. [3]

Паровые машины для электрических станций

Применения электротехники стали развиваться в 80-х годах прошлого столетия. Электрические установки имели первоначально небольшие

[1] Ф. Фармаковский. Перегретый пар в паровозах большой мощности, стр. 15, Одесса, 1911.

Подробный обзор паровозных перегревателей и всех деталей паровозов с перегретым паром имеется также в книге Garbe «Dampflokomotiven der Gegenwart, Berlin, 1907, 1-е изд.

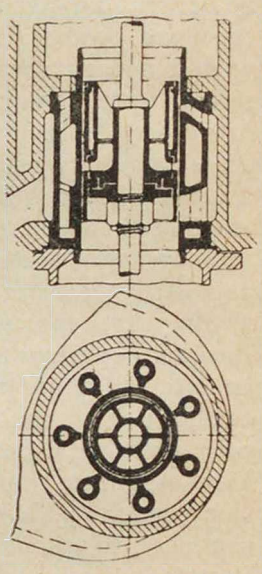
[2] Вестн. общ. технологов, № 42, 1916.

[3] Детали таких золотников приведены в каталоге Ганноверского завода («Honomag») для выставки в Мальмё в Швеции в 1914 г.

мощности и нуждались в паровых двигателях с большим числом оборотов (для избежания сложных передач от машины к динамо-машине).

Поэтому в эти годы возрос спрос на подобные паровые машины. Быстроходные паровые машины имели уже давно большое распространение в Соединенных Штатах, а потому это направление в европейском машиностроении характеризуется сильным влиянием американских быстроходных паровых машин.

Своеобразные экономические условия Соединенных Штатов XIX столетия отразились на всем их машиностроении и в частности — на постройке паровых машин.[1] Высокая заработная плата американских рабочих требовала удешевления производства путем специализации, постановки его серийным образом; дешевизна же угля не требовала в случае небольших установок особенной заботы об экономии в расходе топлива; для таких установок важнее была простота устройства, связанная с легкостью ухода при условии надежности в работе. Отсюда произошли многие особенности американского машиностроения: так, с самого начала постройки паровых машин, в то время как в Англии строились почти исключительно машины с конденсацией, в Америке Эванс ввел машины высокого давления без конденсации, и последний тип получил большое распространение в Соединенных Штатах. Корлисс не сочуствовал постройке машин многократного расширения, и машины тройного расширения не были особенно распространены в Соединенных Штатах. В общем, в Соединенных Штатах, как заметил Гутермут, резко выделились 2 типа машин: первый тип — крупных машин, исполняемых индивидуально с применением новейших усовершенствований для понижения расхода пара (преимущественно с распределением Корлисса) и другой тип — быстроходных машин, простых, дешевых, исполняемых серийно;[2] аналогичную характеристику американским паровым машинам дает и



Фиг. 117

[1] Особенности американского машиностроения были прекрасно характеризованы в отчете проф. В. Л. Кирпичева о командировке на Чикагскую всемирную выставку. В. Л. Кирпичев. Отчет о командировке в Северную Америку, Петербург, 1895 г. Характеристика паровых машин на этой выставке и вообще американских паровых машин дана также в статьях проф. Гутермута (Gutermuth) в Z. d. VDI, 1896 г. Но и раньше американские паровые машины обратили на себя внимание европейских специалистов, особенно проф. Радингера, давшего подробный отчет о паровых машинах на выставке в Филадельфии.

[2] По поводу покупки этих машин в Америке Гутермут замечает, что она делается по каталогу «проще, чем в Германии приобретается швейная машина».

проф. Левенсон в своем гораздо более позднем сочинении. [1] Нас интересуют в настоящем отделе именно быстроходные американские машины, послужившие прототипом для позднейших европейских машин.

Быстроходные машины простейшей конструкции без регулятора, с числом оборотов, доходившим до 400 и даже 600 в минуту, применялись для приведения в движение круглых пил. Но машины эти были очень несовершенны. Начало настоящего развития более совершенных быстроходных машин в Соединенных Штатах связано с именем Портера (Charles Porter). Последний был по профессии адвокатом, а не инженером, но оставил крупнейший след в истории паровой машины и даже машиностроения вообще, так как применение больших скоростей потребовало особой заботливости относительно уравновешения движущихся частей, выбора материала и исполнения машины. Портер работал вместе с машиностроителем Алленом (по профессии монтером машиностроительной фабрики); поэтому созданная ими машина носит название машины Портер-Аллена. [2] Первая машина этой системы была построена в 1861 г. Машина эта была горизонтальная, число оборотов 160 в минуту — резко отличалось от нормального тогда числа оборотов около 40 в минуту. Органами парораспределения являлись отдельные плоские золотники для впуска и выпуска, уравновешенные сверху особыми неподвижными плитами. Внешним органом парораспределения был эксцентрик, соединенный с кулиссой. От камня этой кулиссы шла тяга к качающейся пластинке, приводящей в движение передачу к золотникам. Регулятор действовал на эту тягу и изменял отсечку в широких пределах. В виду довольно значительного сопротивления распределительных органов Портер усовершенствовал регулятор Уатта, снабдив его тяжелой массой, что увеличило его так называемую «энергию»; этот регулятор известен под именем «регулятора Портера». Большое внимание Портер обратил на уравновешение движущихся частей своей машины и на конструкцию их, предупреждавшую удары; вопросы эти имели решающее значение для машин с большим числом оборотов и с большой скоростью поршня. В этом отношении Портер явился инициатором; его машина на Парижской выставке 1867 г. обратила на себя внимание венского проф. Радингера, который написал специальное исследование о машинах с большой скоростью поршня. [3] Книга эта, в которой исследуются вопросы о равномерности и спокойствии хода быстроходных машин, произвела большое впечатление в европейских технических кругах и много содействовала развитию постройки быстроходных машин в Европе.

---

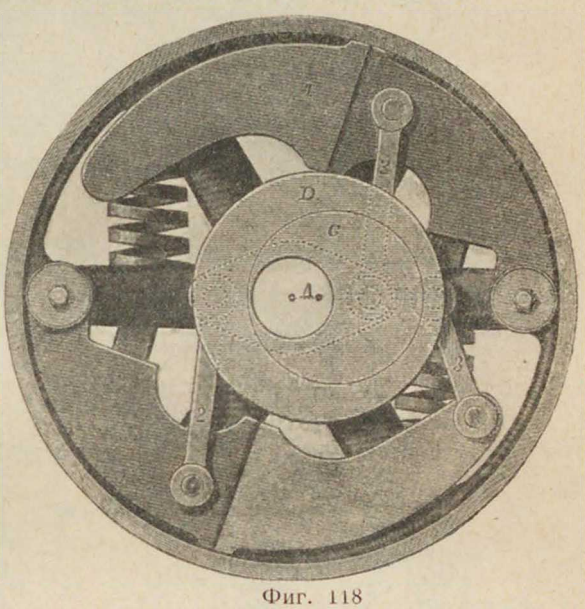
[1] Л. Б. Левенсон. Современные американские паровые машины. Петербург, 1912.

[2] О деятельности своей как инженера Портер оставил весьма интересные воспоминания: Ch. Porter. Engineering Reminiscences. «American mashinist» и «Power», 1903—1906 гг.

[3] Radinger. Dampfmaschine mit hoher Kolbengeschwindigkeit, 1-е изд. 1870 г. и 3-е (переработанное). Wien, 1892.

Возвращаясь к машинам Портера, надо сказать, что они строились с в 70-х годах мощностью от 25 л. с. (число оборотов —350 в минуту, средняя скорость поршня — 3,5 м/сек) до 770 л.с. без конденсации и в 1 000 л.с. с конденсацией; последние машины делали 112,5 оборотов в минуту и имели среднюю скорость поршня, равную 4,6 м/сек. Машины Портера и в отношении расхода пара являлись весьма экономичными.

В 70-х же годах начали развиваться в Америке быстроходные паровые машины с плоскими регуляторами, которые получили особенное значение для небольших электрических установок в 80-х годах. Плоские или «осевые» регуляторы предлагались и раньше (инженером Броуном на заводе Зульцера еще в 1862 г.), но развитие они получили в Америке. Эти регуляторы состоят обыкновенно из одной — двух тяжелых масс, помещенных внутри маховика или шкива. При увеличении скорости, массы имеют стремление расходиться, действуя при этом на пружины, растягивающиеся или сжимающиеся. При этом вращении масс оси их действуют на рычаги, перемещающие распределительные эксцентрики, причем изменяются тем или иным способом элементы парораспределения. На фиг. 118 изображен плоский регулятор Армингтона и Симса.



Фиг. 118

В позднейших плоских регуляторах действие расходящихся масс усиливается действием тяжелой вращающейся массы. Это — так называемые «и н е р ц и о н н ы е» регуляторы, принцип которых был предложен Сименсом еще в 1845 г. [1]

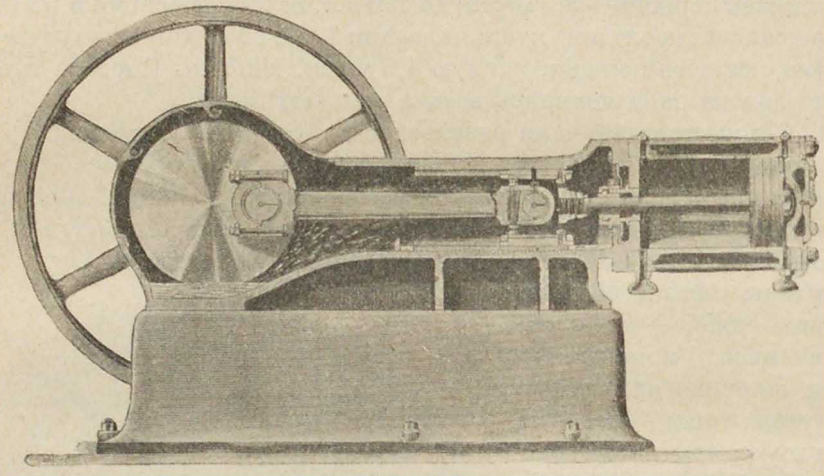
Американские быстроходные машины с плоскими регуляторами довольно однообразны: распределение у них делается посредством поршневых (или другим образом уравновешения) золотников, цилиндр прикреплен свободно к раме. Общее расположение такой машины (системы Айд—Ide) показано на фиг. 119.

Вообще, эти американские быстроходные машины строились небольших мощностей, преобладали двигатели до 50 л. с., число оборотов около 200—250.

В 80-х годах, в связи с потребностью в быстроходных двигателях для динамомашин, быстроходные двигатели стали проникать и в Европу.

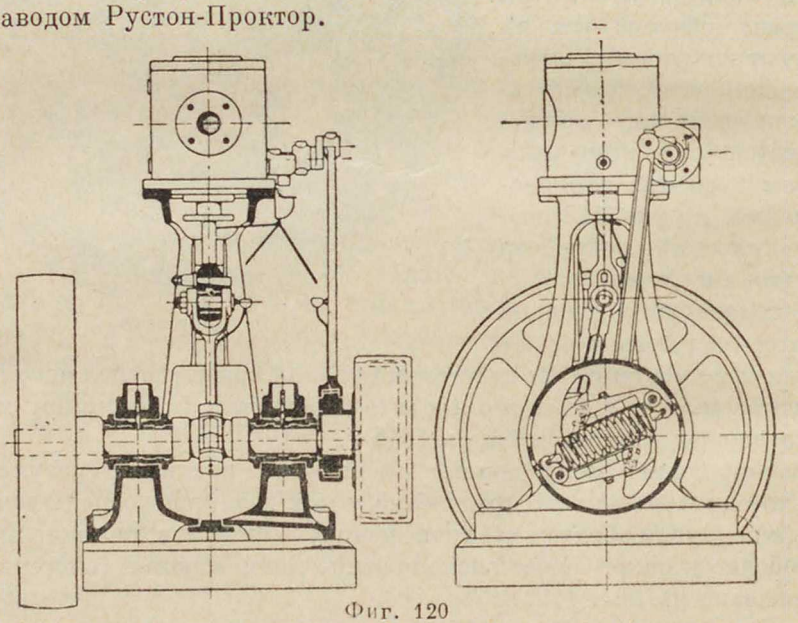
[1] Теория этих регуляторов была дана Стодола (A. Stodola). Z. d. VDI, стр. 506, 1899.

Здесь строились частью просто копии американских машин, частью самостоятельно разработанные конструкции с плоскими регуляторами. На фиг.



Фиг. 119

120 представлен разрез машины Дёрфель-Прёлля, исполнявшейся Пражским заводом Рустон-Проктор.

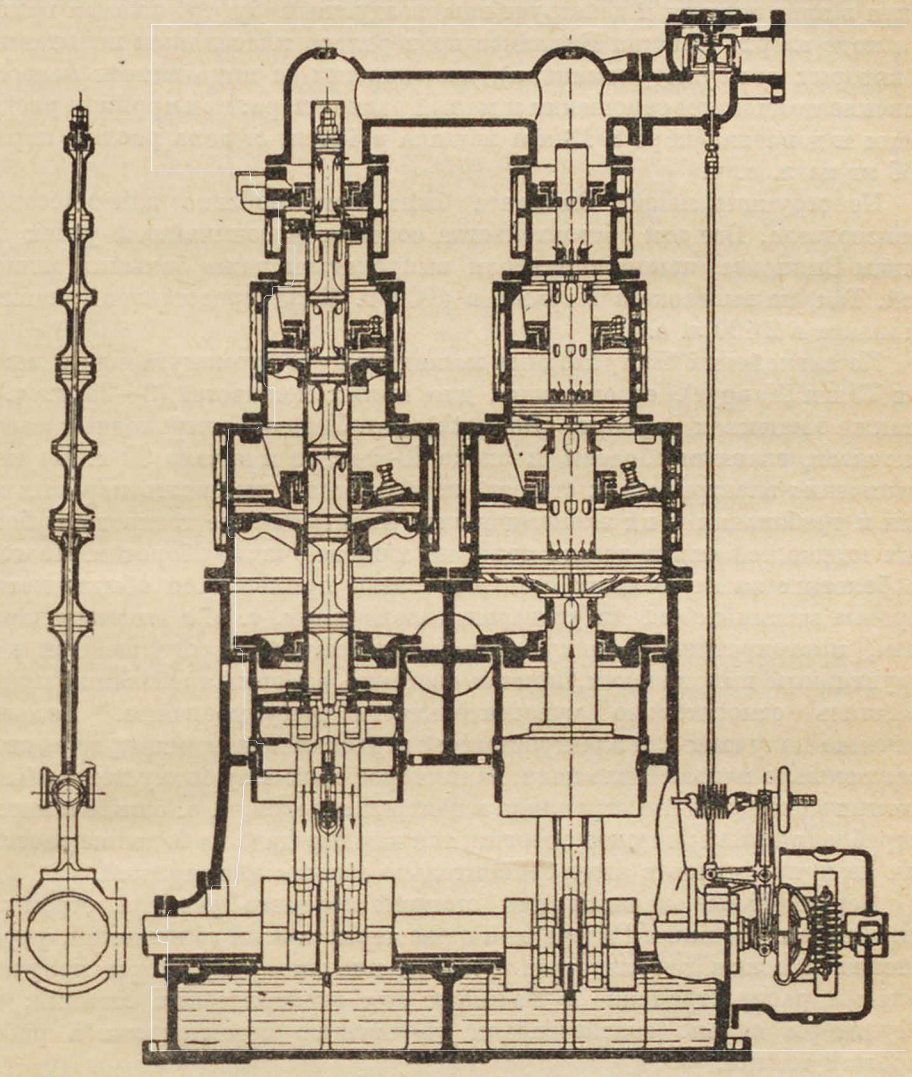


Фиг. 120

На ряду с обыкновенными быстроходными паровыми машинами двойного действия, о которых мы только что говорили, в это же время стали строить еще более быстроходные машины с числом оборотов до 400—600 в минуту. [1] Простое действие являлось здесь в том отношении удобным,

[1] Машины Бротерхуда (Brotherhood) малых размеров и малой мощности доходили даже до 1000 оборотов в минуту.

что при нем нет перемены направления давления на поршень, поэтому машины эти не испытывают удара. Чтобы получить нужную мощность при простом действии пара в цилиндре, нужно было в этих машинах при-



Фиг. 121

менять несколько спаренных цилиндров. Эти машины удобно соединялись непосредственно с динамомашинами и отличались дешевизной, но давали большой расход пара и быстро изнашивались. Из этих машин выделялись своей продуманностью и высокими качествами машины Вестингауза (Westinghouse) и Вилланса (Willans).

Машины Вилланса (фиг. 121) представляют собой соединение двух рядов цилиндров, причем в каждом ряду цилиндры (в больших машинах

3 цилиндра) расположены в тендем, а кривошипы этих двух рядов расположены под 180°. Все цилиндры — простого действия, распределение делается центральным поршневым золотником. Крейцкопф сконструирован в виде поршня и действует как воздушный буфер, сжимая воздух при ходе вверх. Машина Вилланса подверглась тщательным испытаниям (о которых мы уже упоминали), выяснившим ее выдающиеся качества в эксплоатационном отношении и малый расход пара: при тройном расширении и давлении пара в 13 ата машина в 400 л. с. дала расход пара в 5,68 кг на л. с. ч.

Конструкция машин Вилланса была приспособлена для массового производства. Все эти обстоятельства создали чрезвычайный успех машинам Вилланса, каковые и стали выпускаться даже больших мощностей. Так, на выставке в Париже в 1900 г. была представлена машина Вилланса в 2 400 л. с.

Из английских быстроходных машин следует упомянуть еще о машинах Танги (Tangye), строившихся для малых мощностей (3—26 л. с.), [1] а также о машинах Рауворта (Roworth) и др. Успехи быстроходных машин относятся, главным образом, к эпохе 80-х годов и начала 90-х. По мере увеличения электрических станций повышалась и мощность паровых машин и требования к их экономичности. Электрические генераторы больших мощностей стали делать тоже на меньшее число оборотов. Поэтому на больших электрических станциях стали применяться обыкновенные паровые машины со всеми усовершенствованиями, т. е. с высоким давлением, многократным расширением, конденсацией и совершенным конструктивным выполнением, причем особенно высокие требования предъявлялись относительно чувствительности регулирования. Большое значение получили для электростанций вертикальные машины, вследствие сравнительно меньшей площади, занимаемой ими: в ту эпоху центральные электрические станции строились в центрах городов, т. е. ближе к местам потребления электрической энергии, так как передача на большие расстояния не применялась в виду сравнительно низких напряжений.

Вертикальные машины для станций среднего размера строились с двойным золотником Ридера или с расширительным золотником, управляемым плоским регулятором. Вообще, плоские регуляторы получили большое распространение в машинах для электрических станций; эти регуляторы сильно содействовали увеличению безопасности в работе паровых машин. [2]

Самые большие вертикальные машины и все горизонтальные машины даже средних мощностей для электрических станций строились в Европе при применении перегретого пара большинством ведущих фирм клапанными; иногда в цилиндрах низкого и среднего давления применялись

---

[1] А. И. Сидоров. Усовершенствованный регулятор Танги. Бюлл. Политехн. общ., № 5, 1894—1895.

[2] Kerner. Unfallverhütung und Betriebsicherheit. Ztschr. f. Gewerbehyg., 1912.

Таблица 5

Название фирмы	Число оборотов в мин.	Мощность л. с.	Система и число цилиндров
1) Зульцер	33,5	1 700	Горизонтальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, клапанная, своб. падение
2) Бр. Карельс . . .	94	1 000	Горизонтальная, двойного расширения, 2-цилиндровая, клапанная, своб. падение
3) Аугсбург-Нюренберг	72	1 900	Горизонтальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, клапанная, своб. падение
4) Первая Брюннская фабрика	125	910	Горизонтальная, двойного расширения, 2-цилиндровая, клапанная Лентца
5) Борзиг	83,5	2 230	Вертикальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, клапаны Кольманов (постр. для 14 ата и 2 400 л. с.)
6) Дюжардена (Dujardin) в Лилле . . .	72	1 700	Горизонтальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, кранное
7) Эльзасское общество механич. констр.	70	1 200	Вертикальная, клапанная, 2-цилиндровая, кранное (Фрикара)
8) Эшер-Висс	100	1 000	Горизонтальная, тендем, 2-цилиндровая, кранное
9) Ван ден-Керхове .	100	1 000	Горизонтальная, тендем, 2-цилиндровая, поршневая, клапаны собственной системы
10) Ринггофер (Прага) .	95	1 600	Вертикальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, клапанная, своб. падение в цил. высок. давления, кранное — в цил. низкого давления
11) Аугсбург-Нюренберг	83	2 000	Вертикальная, тройного расширения, 3-цилиндровая, клапанная со своб. падением в цил. выс. давл., кранное в цил. низк. и средн. давления
12) Делоне-Бельвиль .	250	1 750 (при норм. давлении 13,5 ата)	Вертикальная, тройного расширения, 4-цилиндровая, цилиндр. золотн.
13) Този	160	800 (при норм. давлении 14 ата)	Вертикальная, четверного расширения, 4-цилиндровая, цилиндр. золотн.

краны. В Америке преобладали все же машины с кранами Корлисса, которых держались еще в 1900 г. некоторые европейские фирмы.

Интересные сведения о развитии электрических станций в Берлине и об эволюции применяемых в них паровых машин содержатся в книге Кеммона (Kemmonn);[1] там имелись не только немецкие машины, но и бельгийские (Van den Kerhove) и швейцарские (Sulzer) машины. Своего кульминационного пункта развитие паровых машин достигло около 1900 г. (когда только начиналось применение паровых турбин). Поэтому интересным материалом для суждения об этом этапе развития паровой машины могут служить отчеты о выставке 1900 г.[2] Конечно, на этой выставке различные страны были представлены неравномерно: по числу преобладали французские машины (но среди них было много заводских машин небольших мощностей, не характерных для этой эпохи), почти отсутствовали американские, плохо были представлены английские (если не считать большой машины Вилланса, о которой мы говорили). Но на выставке был представлен целый ряд самых лучших и самых мощных машин того времени. Приводим данные о некоторых из них (давление на выставке было принято равным 11 ата). (См. табл. 5.)

В следующие годы (1900—1906) стали строиться еще большие машины в 3000—6500 л. с.[3] (и даже 8000 л. с. завода Аллис-Чалмерс); но к этому времени уже стала заметной конкуренция паровых турбин и вскоре постройка таких больших машин для электрических станций прекратилась.

В этих последних крупных стационарных машинах достигался высокий экономический коэффициент полезного действия: расход тепла на 1 эффективную л. с. ч. достигал в машине Зульцера в 3000 л. с. — 2850 кал,[4] что дает индикаторный термический к. п. д. $= \frac{632,3}{2350} = 0,22$. Если принять механический к. п. д. машины равным 0,94 и к. п. д. котла — 0,85, то получится полный экономический к. п. д. всей паровой установки, равный $0,22 \cdot 0,94 \cdot 0,85 = 0,17 \cdot 8$, т. е. в этой машине получилось полное использование тепла, равное 17,8%. Это и есть высшее использование тепла, которого достигли довоенные паровые машины.

На фиг. 122 приведена типичная горизонтальная клапанная машина тройного расширения.

На фиг. 123 приведена вертикальная машина тройного расширения в 500 л. с. с пораспределением Ридера в цилиндре высокого давления,

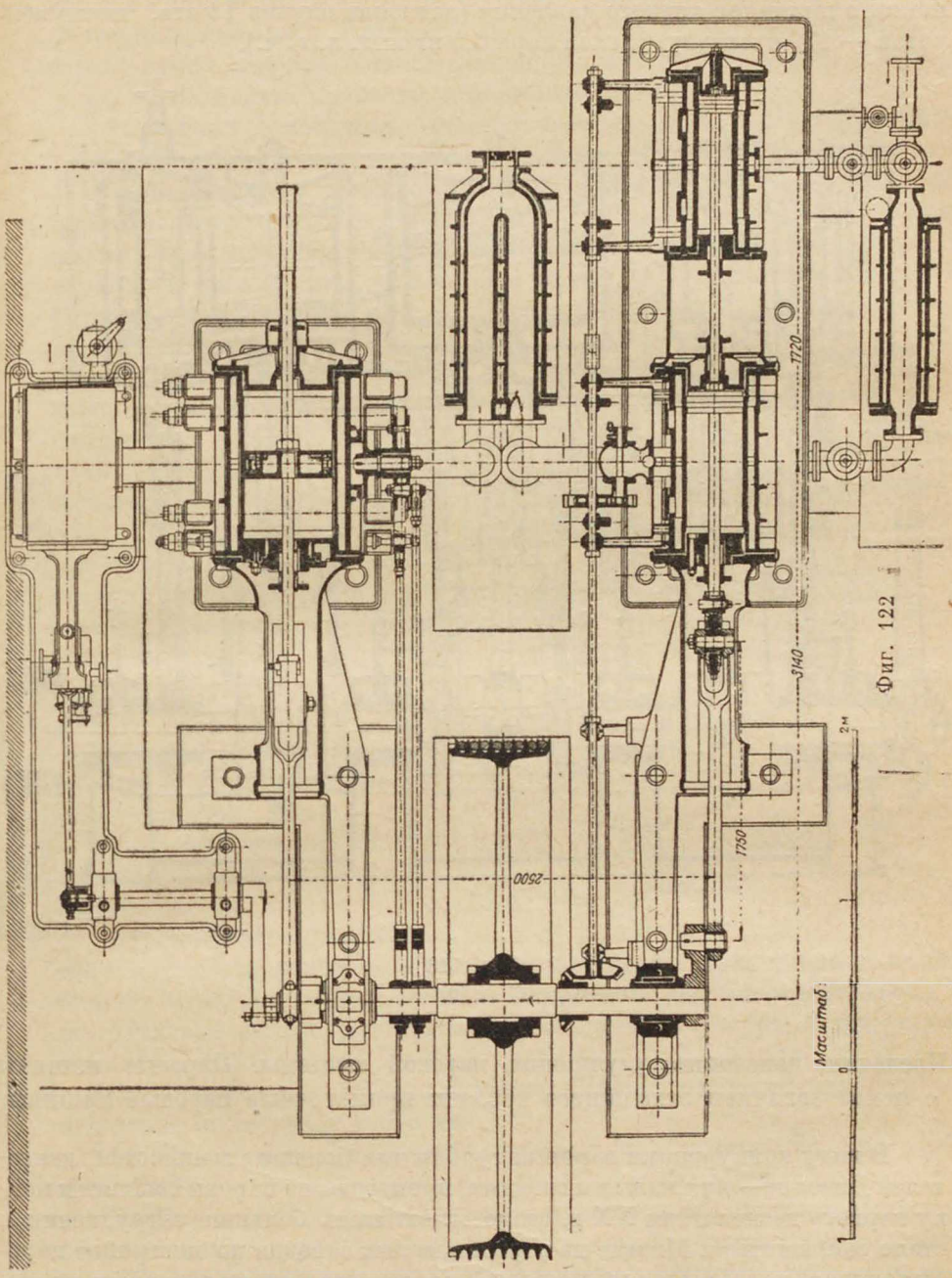
---

[1] Kemmonn. Berliner Elektrizitätswerke bis Ende 1896, Berlin, 1897.

[2] Книга Eude, статьи Gutermuth в Z. d. VDI за 1900 и 1901 г. и статьи проф. Н. А. Быкова в Вестн. общ. технологов за 1901 г.

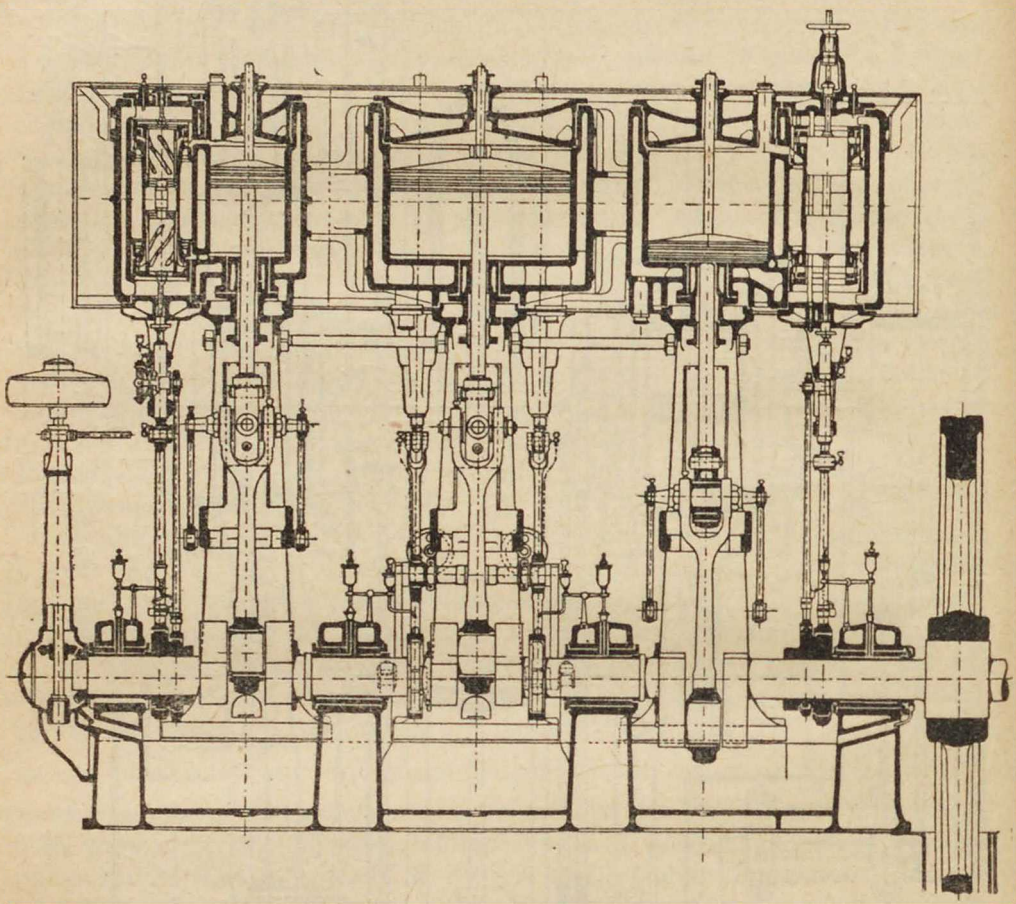
[3] Для одной из электрических станций в Берлине машина тройного расширения построена заводом Зульцера. Данные об этой машине приведены в Z. d. VDI, 1905.

[4] В опыте с этой машиной тройного расширения получились следующие данные: давление впуска —13,3 ата, температура пара —314°, мощность —2930 л. с., расход пара 4,05 кг/инд. л. с. ч., что соответствует расходу в 2930 кал. инд. л. с. ч. По сообщению Стодола (Stodola, Dampf und Gasturbinen, 1922 г., стр. 1074) расход этот позже понизился до 2850 кал/инд. л. с. ч.



Фиг. 122

Мейера — в цилиндре среднего давления и плоским уравновешенным золотником в цилиндре низкого давления (давление впуска 12 ата, число оборотов — 120 в минуту, расход пара 6,5 кг/инд. л. с. ч.).



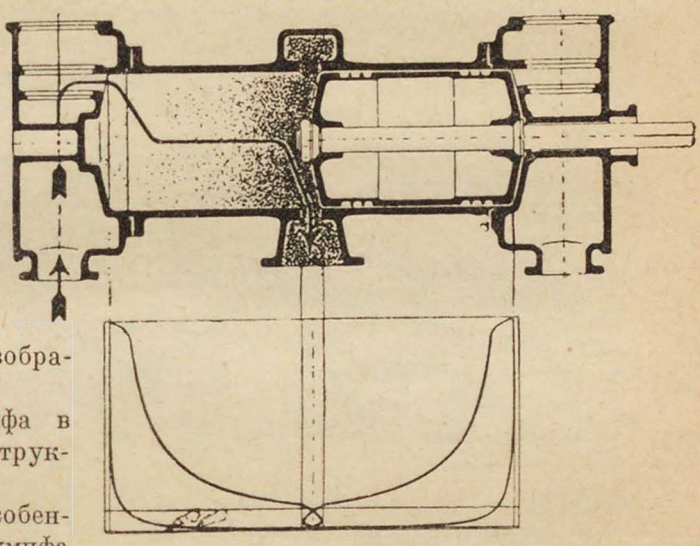
Фиг. 123

Последние довоенные улучшения паровой машины. Паровые машины с использованием отходящего тепла и прямоточные паровые машины

В виду конкуренции паровых турбин для больших мощностей, двигателей Дизеля — для малых и средних, производство паровых машин к концу первого десятилетия XX в. стало испытывать большие затруднения и стало сокращаться. Многие из первоклассных заводов по постройке паровых машин, не закрывая совсем этого производства, стали развивать производство других тепловых двигателей: паровых турбин, дизельмоторов. По этому пути пошли заводы Зульцера, Аугсбург—Нюренберг, Гёрлицкий машиностроительный завод и др. Но и эти заводы и другие, вполне

сохранившие только производство паровых машин, все старались увеличить конкурентоспособность паровых машин, внося в их работу новые усовершенствования. Таких путей было два: 1) непосредственное улучшение самой паровой машины, приводящее к ее упрощению и удешевлению; 2) соединение силового устройства с тепловым.

В первом отношении большое значение приобрели предложенные в 1907 г. «прямоточные машины» Штумпфа («Gleichstromdampfmaschine»). В машине Штумпфа использовано то соображение, которым отчасти мотивировалось и введение отдельных путей для входа и выхода пара, именно, что при этом впускной канал не охлаждается выходящим паром, а потому входящий свежий пар испытывает меньшую начальную конденсацию. Штумпф делает выпуск для пара через отверстия, сделанные в середине цилиндра; выпуск происходит после того, как поршень откроет эти отверстия. Этот способ выпуска напоминает выхлоп в двухтактных двигателях внутреннего сгорания. Принцип работы машины Штумпфа изображен на фиг. 124.



Фиг. 124

Машина Штумпфа в первоначальной конструкции — на фиг. 125.

Характерными особенностями машин Штумпфа являются:

1) Применение высокого впускного давления и высокого перегрева. Так, в одной из первых машин Штумпфа, построенной на Эльзасском машиностроительном заводе, давление впуска достигало 12 ата, а температура перед впускным клапаном —331°. [1]

2) Применение высокого вакуума. В той же машине давление в конденсаторе было равно 0,075 ата.

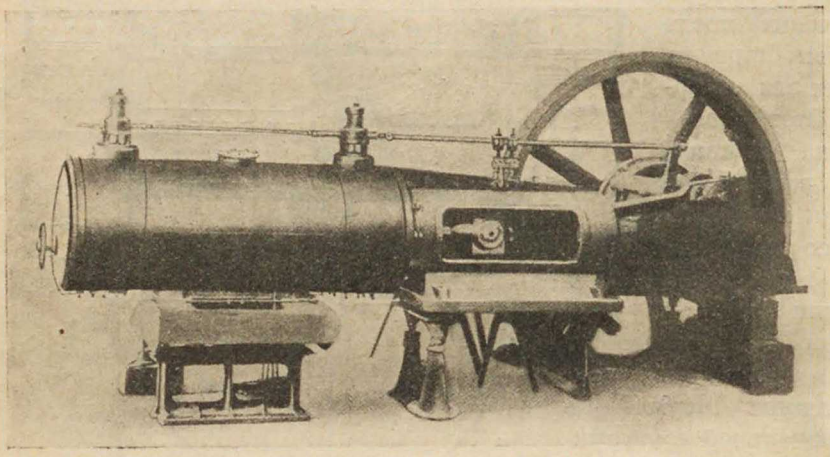
3) Применение высокого сжатия, что видно из диаграмм на фиг. 124.

4) Клапанное парораспределение. Клапаны сначала применялись обыкновенные двухседельные, затем — своей специальной конструкции. Внешним органом парораспределения является тяга с роликами, управляемая эксцентриком и действующая на кулачек, сделанный

[1] Stumpf. Die Gleichstromdampfmaschine, 1911, стр. 54.

на шпинделе клапана. Регулятор — плоский, действующий на эксцентрик.

При этих условиях работы машина Штумпфа при расширении пара в одном цилиндре давала расход пара 4,6 кг/инд. л. с. ч., т. е. не выше хорошей машины двойного расширения. Естественно, что результат этот обратил на себя большое внимание и машина Штумпфа быстро получила большое распространение. Из предшественников Штумпфа называется, главным образом, английский инженер Тодд (английский патент № 7301, 1885 г.), но сходство между их предложениями только внешнее. По сообщениям Штумпфа,[1] он предлагал свою машину первоначально 30 германским заводам и встретил, наконец, сочувствие сначала только у директора австрийского завода «Первый Брюннский машиностроительный завод»,



Фиг. 125

Сметана. Первая машина Штумпфа и была исполнена на этом заводе в 1907 г.[2] Сейчас же после этого производство машин Штумпфа началось на Гёрлицком машиностроительном заводе и на других заводах: Зульцера, Аугсбург—Нюренберг, Эргардт и Земер и др. Она быстро проникает в область машин для металлургических и горных заводов, таких, как прокатные, рудоподъемные и машины для воздуходувок; она начинает строиться для больших мощностей, как сдвоенная и как строенная, что представляет в этих областях особенно большие удобства по сравнению с машинами многократного расширения. Она проникла скоро в область локомобилестроения и паровозостроения. Штумпф пишет, что к 1911 г. машин его системы было построено до полумиллиона л. с. Машины Штумпфа продолжали строиться с успехом и после войны. Сведения о них имеются

[1] Предисловие к вышецитированной его книге «Die Gleichstromdampfmaschine».

[2] Die hundertjährige Geschichte der Ersten Brünner Maschinenfabrik. Leipzig, 1921 г., стр. 167—168.

в книге А. А. Радцига «Новейшие течения в развитии тепловых двигателей». [1]

В заключение надо заметить, что предположение Штумпфа о малом охлаждающем действии стенок цилиндра в его машине оспаривается многими учеными. Так, проф. Грассман производил сравнительные опыты обыкновенной машины с 4 клапанами для впуска и выпуска при давлении 13 ата и температуре в 380° при высоком сжатии и прямоточной машины и получил для первой даже более благоприятные значения, а именно — расход тепла, равный 3 855 кал. на инд. л. с. ч., тогда как для нормальной прямоточной машины получился расход, равный 3966 кал/инд. л. с. ч. [2]

Вопрос этот подлежал бы дальнейшему исследованию, но неоспоримыми остаются все-таки экономичность и конструктивные достоинства этой машины, обеспечивающей ей, как выражается проф. Г. С. Жирицкий, «доминирующее место в промышленности». [3]

Что касается использования отходящего пара, то очень рано еще встречается использование его для целей отопления в машинах с противодавлением. Так, еще в 1830 г. в объявлении о машинах Брюннского завода говорится, что он изготовляет «паровые машины от 1 до 20 л. с. с конденсацией и без конденсации. Пар из машин без конденсации может быть употреблен с выгодой на нагревание жидкостей или на паровое отопление при помощи соответственных приспособлений, изготовляемых заводом». [4]

Это употребление пара из машин, работающих без конденсации, встречается часто и дальше,[5] но особенного внимания к себе не вызывает. Так, например, в таком распространенном учебнике по паровым машинам, как Польгаузен, в последнем (3-м) дополненном издании об этом использовании не говорится ни слова.

Однако, конкуренция с другими двигателями все же заставляла в последнее десятилетие перед войной думать об этом использовании, причем начинают пользоваться не только машинами с противодавлением, но и машинами с отбором пара.

В этом отношении большие заслуги принадлежат Эберле, который показал выгоду применения отобранного из ресивера пара в таких производствах, как пивоваренное, бумажное. [6] В последнее десятилетие перед войной вопросу о построении паровых машин с противодавлением и отбором пара уделяется уже большое внимание: крупные заводы по постройке паровых машин вырабатывают соответственные типы машин (для отбора — преимущественно тендем-машины с особым

[1] Изд. Academia, 1923 г., стр. 39. См. тоже 2-е издание книги Штумпфа.

[2] Опыты Нэгеля (Naegel). В Z. d. VDI, 1913.

[3] Г. С. Жирицкий. Паровые машины, 4-е изд., Киев, 1930, стр. 40.

[4] Цитированное издание к столетию Брюннского завода, стр. 35.

[5] Мнение о преимуществе при условиях русского климата ставить машины с использованием отходящего пара для целей отопления высказано было В. Л. Кирпичевым в его докладе «Машиностроение в России», прочитанном в 1882 г.

[6] Eberle, Ztschr. des Bayr. Dampfk. und Rev. Vereins, 1903, 1904, 1906 гг.

регулированием); завод Аугсбург-Нюренберг выпускает специальный каталог таких машин (№ 27), завод Зульцера, перешедший вообще к постройке прямоточных одноцилиндровых машин (даже до самых больших в 2000 л. с. мощностей) для работы с отбором пара, строил специальные тендем-машины с прямоточным цилиндром низкого давления; для этих машин завод Зульцера сконструировал специальный ртутный регулятор давления, ставящий мощность машины в зависимость от количества отбираемого пара. Для машин с противодавлением завод Зульцера предлагал свои обыкновенные одноцилиндровые машины. Такое же внимание уделяли этому вопросу и другие заводы, строившие паровые машины.

Литература по этому вопросу делается обширной; появляется специальное сочинение Шнейдера; паровые машины с использованием отходящего пара исследуются и рекомендуются рядом немецких деятелей: Эберле, Бартом (Barth), Готтингером (Hottinger), Рейтлингером (Reutlinger) и др.[1]

Все эти работы в значительной мере подготовили послевоенное развитие этого вопроса, когда он стал одним из доминирующих в теплотехнике.

Локомобили

Мы говорили уже на стр. 105, что локомобили появились прежде всего как двигатели для приведения в движение сельскохозяйственных машин; затем локомобили стали применяться и для других целей, именно в тех случаях, где нужна была передвижная силовая установка небольшой мощности.

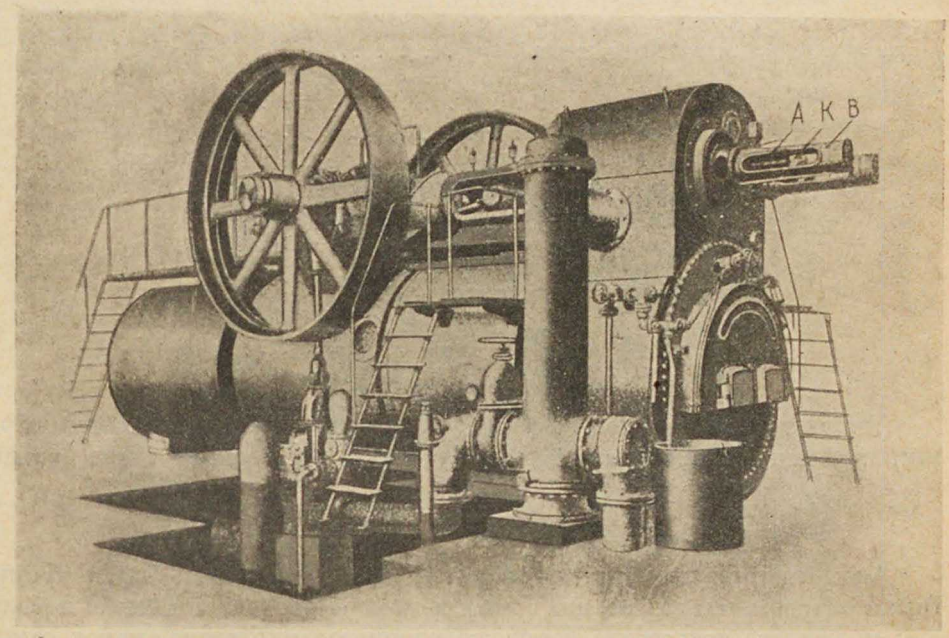
До начала 80-х годов наибольшее распространение имели английские локомобили благодаря хорошим качествам, а также дешевизне, достигаемой массовым производством. Но с этого времени приобретают значение самостоятельно сконструированные американские и немецкие локомобили. Однако, на иностранных рынках в области обыкновенных сельскохозяйственных локомобилей долго еще преобладали английские локомобили. Так, даже в 1896 г. на второй очередной выставке сельскохозяйственных машин и орудий в Москве было представлено 4 английских локомобиля и по одному немецкому, венгерскому и американскому. [2] Особенное значение приобрели вскоре германские заводы Вольфа (R. Wolf) в Магдебурге и Ланца (H. Lanz) в Маннгейме, постепенно перешедшие к типу больших не перемещаемых полулокомобилей, в которых применены все новейшие усовершенствования (высокое давление, перегрев,

---

[1] Список литературы (далеко неполный) приведен в книге Schneider «Die Abwärmeverwertung», 4-е изд. 1923 г., стр. 76—78. Работы авторов, названных в тексте, помещались в журналах: Z. d. VDI, 1911, 1912, 1913 гг., Z. d. Bayr. Dampfk. u. Rev. Ver. 1907, 1908, 1909, 1912 гг., Z. für Kessel und Dampfbetrieb, 1912, 1914 гг.

[2] Отчет по экспертизе локомобилей (составленный В. И. Гриневецким), Москва, 1898 г.

многократное расширение). [1] Предложения о применении двойного расширения и даже перегретого пара в локомобилях делались еще в 60-х годах (английский патент Wenham № 1386 от 6 июня 1860 г.), но распространение компоунд-локомобилей относится к 80-м годам и система эта применяется в локомобилях подвижных, небольших мощностей. Первый компоунд-локомобиль был построен на заводе Вольфа в 1883 г. и при мощности в 48,9 эфф. л. с. расходовал 8,76 кг/эфф. л. с. ч. пара и 1,33 кг/эфф. л. с. ч. угля.



Фиг. 126

В 80-х годах и фирма Ланца в Маннгейме тоже перешла к постройке компоунд-локомобилей. Обе эти фирмы сохранили производство одноцилиндровых, сравнительно небольших, локомобилей с работой насыщенным паром, но особенное развитие получила на этих заводах постройка полулокомобилей. На выставке 1900 г. в Париже завод Ланца выставил 300-сильный полулокомобиль; такой же локомобиль был выставлен и заводом Вольфа. Затем между этими заводами началось соперничество в отношении увеличения размеров построенных локомобилей и, в особенности, в отношении экономии потребляемого пара. Вольф строил локомобили для перегретого пара с цилиндрическими золотниками и осевым

[1] Завод Вольфа был основан в 1862 г.; тогда же был построен там первый локомобиль, находящийся ныне в Немецком музее в Мюнхене. Полная история завода Вольфа изложена в специальном юбилейном издании: C. Matschoss, «Die Maschinenfabrik R. Wolf». Magdebourg, 1862—1912».

регулятором, завод Ланца — с клапанным парораспределением Лентца. На выставке 1910 г. в Брюсселе был выставлен полулокомобиль Ланца мощностью в 1000 л. с., Вольф (в каталоге своем 1912 г.) приводит локомобиль VK XII с нормальной мощностью в 750 л. с. На фиг. 126 приведен локомобиль новейший системы Вольфа, на фиг. 127 — цилиндр того же локомобиля, показывающий соединение цилиндров и ход пара в них (цилиндр низкого давления — прямоточный). Для характеристики условий работы этих локомобилей приводим данные одного из испытаний локомобиля Вольфа, исполненного проф. Вайтцингером в 1913 г.

Давление в котле (ати)	15,05
Температура пара перед входом в у. в. д. (° C)	345
Разрежение (в %)	93,6
Число оборотов в минуту	211,46
Средняя индикаторная мощн. (л. с.)	288,9
» эффективная мощ. (л. с.)	277,3
Механический к. п. д.	96
Расход пара $\frac{\text{кг}}{\text{инд. л. с. ч.}}$	3,9
Расход угля $\frac{\text{кг}}{\text{эфф. л. с. ч.}}$	0,486

Теплотворная способность угля дана равной 7835 кал/кг. Таким образом, паровая установка эта дает полное использование тепла, равное

$$\frac{632{,}3 \cdot 100}{7835 \cdot 0{,}486} = 18\%.$$

Аналогичные результаты получались и для локомобилей Ланца. Таким образом, мы видим, что в этих локомобилях (сравнительно небольшой мощности) достигнуто такое же использование тепла, как в самых лучших больших машинах тройного расширения.

В рассматриваемых локомобилях был сделан и ряд других усовершенствований: специальные топки для различных низкосортных сортов топлива, приспособления для утилизации отходящего тепла и другие. Поэтому локомобили эти с успехом выдерживали конкуренцию двигателей внутреннего сгорания до самого новейшего времени.

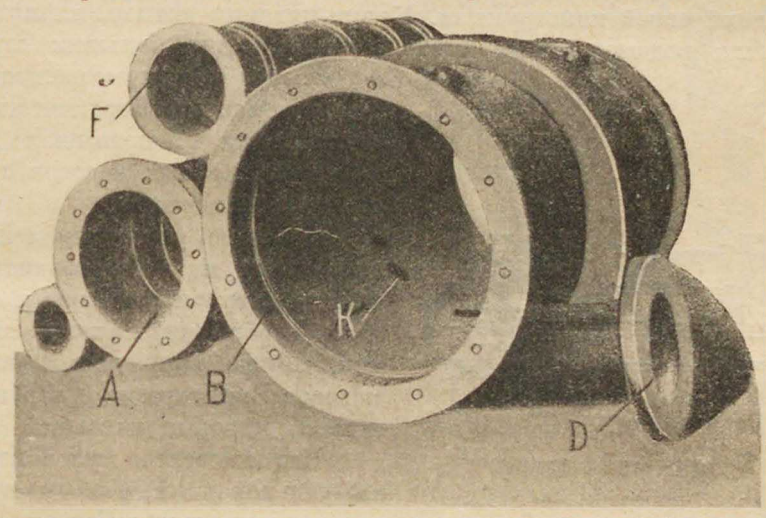
Паровые машины специального назначения

К паровым машинам специального назначения надо отнести водоподъемные машины разного рода и машины металлургических и горных заводов. Что касается водоподъемных машин, то они играли ведущую роль в XVIII столетии, когда паровая машина была создана именно как водоподъемная. Но и в первой половине XIX столетия мы видели, какое видное место занимали в области паровых машин Корнваллийские водоподъемные машины. Во второй половине этого столетия паровые водоподъемные машины продолжают усовершенствоваться и развиваться,

но развитие это носит главным образом конструктивный характер и тесно связано с развитием самих насосов.

Для лучшего использования тепла в этих машинах вводят те же усовершенствования, что и в обыкновенных машинах, т. е. высокое давление пара и многократное расширение. Поэтому мы можем не останавливаться на развитии этих машин, а сказать только о тех водоподъемных машинах, принцип построения которых существенно отличается от обыкновенных паровых машин. К этой категории относятся прямодействующие паровые насосы, инжектор Жиффара (Giffard) и пульзометр.

Первыми по времени появления и главными по своему значению являются паровые насосы американского инженера Вортингтона (Worthington).[1] Изобретение это было вызвано потребностью в создании простого



Фиг. 127

удобного насоса для питания паровых котлов. Первый патент Вортингтона на такой насос в виде простой комбинации парового и насосного цилиндра был взят им в 1841 г.

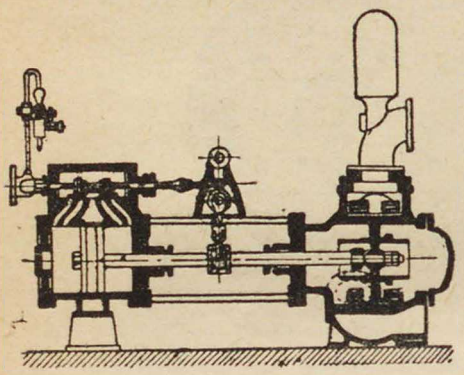
Но затем Вортингтон много лет работал над улучшением и упрощением своей конструкции и, наконец, достиг окончательного благоприятного результата только в 1856 г., создав тип двойного насоса, причем движение одного поршня вызывает движение золотника в другом насосе. Наличность двух насосов, имеющих движение, отличающееся на полхода друг от друга (т. е. расположенных так, что когда один поршень останавливается в конце хода, то другой находится в середине своего хода), дает более равномерную подачу воды. Все детали насоса были

[1] Биография Вортингтона дана в статье: O. H. Müller, «Henry Rossiter Worthington», Beiträge zur Gesch. d. Technik, т. I, 1909. История развития прямодействующих паровых насосов хорошо изложена в книге проф. П. К. Худякова «Построение насосов», Москва, 1899.

чрезвычайно продуманы и выработаны для массового производства. Разрез насоса Вортингтона изображен на фиг. 128.

Пар в насосах Вортингтона работал без расширения, так как при непосредственном соединении парового цилиндра с насосным при расширении получилось бы неравномерное движение системы поршней, то с ускорением, то с замедлением. Для уменьшения расхода пара Вортингтон стал строить насосы своей системы двойного расширения с конденсацией; в этих насосах паровые цилиндры поставлены в тендем. В самых больших своих насосах Вортингтон вводил расширение пара, причем для равномерного движения применял особые «компенсаторы», представлявшие собой цилиндры, в которых сжимался воздух.

Насосы Вортингтона вызвали громадное количество подражаний и изменений своей конструкции. Кроме питания котлов, их применяли для всяких водоподъемных устройств, даже для больших городских водопроводов, причем расход пара в больших насосах Вортингтона с компенсаторами не превышал расхода хороших паровых насосов с вращательным движением.



Фиг. 128

Широкое распространение центробежных насосов, соединенных с электромотором (а позже и с паровыми турбинами) в текущем столетии сильно сократило применение насосов Вортингтона и вообще поршневых паровых насосов.

Что касается пульзометра, то мы уже говорили, что он представляет собою лучше проработанную конструкцию машин Сэвери. Изображение пульзометра дано на фиг. 129.

Расход пара в пульзометре очень велик, но благодаря своей чрезвычайной простоте он получил применение в разного рода небольших и временных установках. Он применялся также для перекачивания загрязненных жидкостей и разного рода растворов на химических заводах.

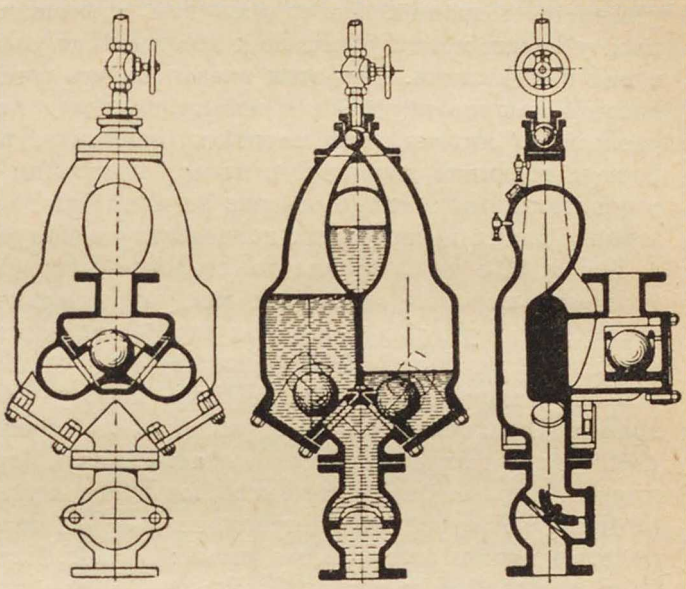
Инжектор был предложен в 1858 г. (французский патент от 8 марта 1858 г.) французским инженером Жиффаром (Giffard). [1]

Из предшественников его надо назвать французского же ученого Манури д'Экто (Manoury d'Ectot),[2] который предложил прибор, в принципе схожий с инжектором, еще в 1818 г., затем Пелльтона (Pelleton),

[1] Краткие исторические сведения об изобретении инжектора имеются в книге Гейзингера «Handbuch für speziell Eisenbahntechnik», т. II, гл. IV, а также у Рюльмана «Allgemeine Maschinenlehre», т. III.

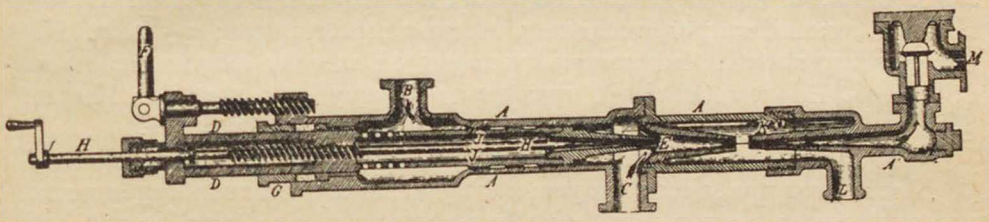
[2] О Манури д'Экто и его изобретении, кроме вышеуказанной книги Гейзингера, приводятся подробные сведения в издании, посвященном столетию французских изобретений в области механики, изданном к выставке 1900 г. E u d e. «Exposition de la mécanique», Paris, 1900, стр. 23 и след.

занимавшегося построением аналогичных по принципу аппаратов около 1830 г., и, наконец, изобретателя металлического манометра, Бурдона, работавшего над этим вопросом в периоде 1848—1857 гг. Жиффару принадлежат некоторые конструктивные улучшения, а, главное, идея применить инжектор к питанию котла, что первоначально многим казалось невозможным, так как они не могли себе представить, как пар, заимствованный из котла, может подавать воду в тот же котел, совершая работу подъема воды, преодолевая давление котла и вредные сопротивления при подаче воды. Теория инжектора дана была Цейнером.[1] Инжектор первоначальной конструкции изображен на фиг. 130.



Фиг. 129

Инжекторы получили чрезвычайное распространение как приборы для питания паровозных котлов; в европейских паровозах они являются исключительными аппаратами, применяемыми для этой цели. Впоследствии по принципу инжектора были устроены инжекционные холодильники Кёртинга, а в новейшее время — паровые эжекторы (тоже приборы, работающие по принципу инжектора), которые получили чрезвычайно широкое применение в качестве приборов для отсасывания воздуха в турбинных конденсаторах.



Фиг. 130

Обращаясь к машинам металлургических и горных заводов, можно сказать то же, что и о водоподъемных машинах: прогресс в области использования тепла в них шел по тем же путям, что и в других областях

[1] G. Zeuner, Civilingenieur, т. VI, 1860, стр. 315.

паровых машин, т. е. в сторону применения более высоких давлений, многократного расширения, позже—применения перегретого пара; кроме того, в рассматриваемых машинах был сделан ряд крупных конструктивных усовершенствований. Из средств для повышения экономии в расходе пара у машин металлургических заводов надо указать еще на применение в них конденсации. При этом оказалось, что установка конденсаторов на каждой машине неудобна и невыгодна вследствие крайне переменного расхода во многих этих машинах (например, в прокатных машинах). Отсюда возникло движение в пользу постройки центральных конденсаторов для нескольких (или даже всех) машин данного предприятия. Постройка таких центральных конденсаторов получила особенное развитие в 80-е и 90-е годы прошлого столетия в связи с развитием числа и мощности паровых машин на металлургических заводах и растущего стремления к уменьшению в них расхода пара и топлива. В области конструкции центральных конденсаций надо особенно отметить заслуги немецкого инженера Вейсса (Weiss) [1] и Эберле (Eberle).[2] Для этих центральных конденсаторов приходилось часто строить специальные приспособления для охлаждения охлаждающей воды (градирни, охлаждающие пруды). Теория этих устройств была дана тоже Вейссом и Мюллером (Müller). [3] Постройкой центральных конденсаторов и холодильных устройств занялись специальные фирмы: Больке, Клейн, Шанцлин и Беккер, Вортингтон, Вир и др.

Развитие паровых котлов во второй половине XIX столетия и в начале XX столетия

Уже в первой половине XIX века появляются разнообразные конструкции паровых котлов; мы говорили уже о котлах Уатта «сундучного» типа, о котлах цилиндрических и с жаровыми трубами. В паровозах и локомобилях применялись котлы с дымогарными трубами. Но и водотрубные котлы предлагались очень рано; так, один американский изобретатель, Барлоу (Barlow), предлагал водотрубный котел в 1793 г.; [4] этот примитивный водотрубный котел изображен на фиг. 131.

Котел Альбана, предложенный около 1840 г., изображен на фиг. 132. Этот котел приближается уже к современным типам водотрубных котлов с горизонтальными трубами. Но распространение этих котлов относится к гораздо более поздней эпохе.

Период же 50—70-х годов характеризуется разного рода конструктивными улучшениями основных типов паровых котлов, а с другой

[1] Статьи Вейсса и специальное сочинение его: Weiss, «Die Kondensation», 2-е изд., Berlin, 1910 г. имели чрезвычайно большое влияние.

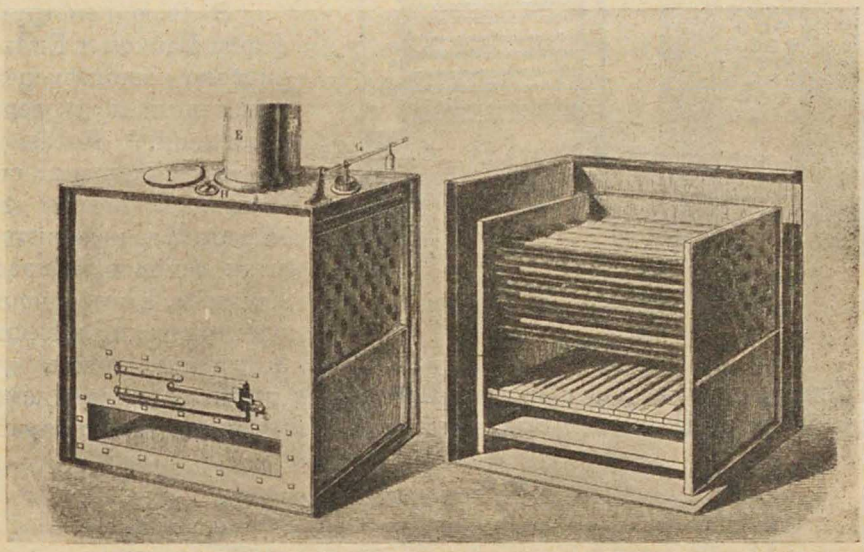
[2] Eberle. Zentralkondensation. Z. d. Bayr. Dampfk. u. Rev. Ver. 3, 4, 1899.

[3] Müller. Rückkühlwerke. Z. d. VDI, стр. 5, 1905.

[4] Armengaud. Traité des machines à vapeur, т. I, стр. 177—183. Это первое предложение водотрубного парового котла не упомянуто у Матчосса, который относит изобретение этого типа к Альбану.

стороны — комбинированием типов цилиндрических жаротрубных котлов и котлов с дымогарными трубами. Такие комбинации строились и в позднейшее время (например, большой котел завода Пидбёфа — Piedboeuf— в Дюссельдорфе в 1902 г.); они строились и до самого новейшего времени и описываются во многих современных учебниках [1] (котлы Гумбольдт, Бернингхауз и др.).

Новейшее развитие водотрубных котлов началось в 60-х годах, главным образом, в Англии и Америке, а в 70-х годах развилось и в Германии.[2]



Фиг. 131

Одним из первых по времени появления является, впрочем, котел французской конструкции, именно котел Бельвилля (Belleville), французский патент на который был взят еще в 1850 г. (28 августа 1850 г.) [3] Он состоит из отдельных трубных элементов, настоящего верхнего барабана в нем нет. Питание котла обеспечивалось специальными автоматическими приспособлениями. Котлы Бельвилля нашли применение, главным образом, в судовых установках на военных кораблях и там они применялись долгое время (и являлись наиболее распространенными).

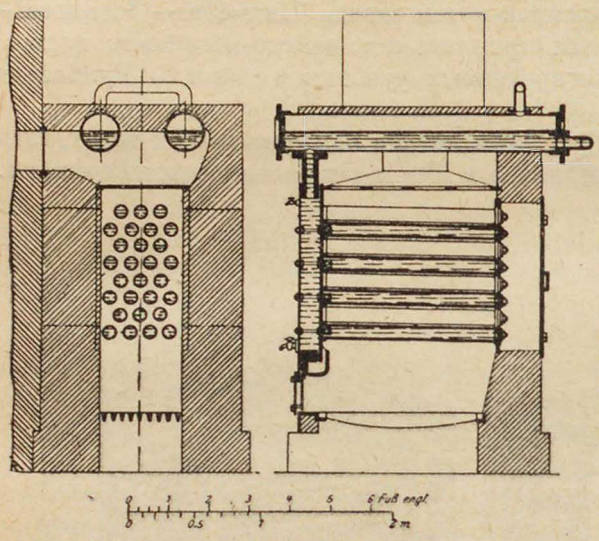
Первой конструкцией водотрубного котла для стационарных установок, имевшая длительный успех, была предложенная в Америке фирмой

[1] См., например, курсы Тецнера, А. И. Иванова, Преториуса и др.

[2] История развития паровых котлов изложена во многих статьях, например, Kugler, «Beitrage zur Entwicklung der Dampfkessels in den letzten 50 Jahren», Beitr. zur Gesch. d. Techn., Bd. IX, 1919.

[3] Патент Бельвилля и многочисленные дополнения к нему описаны в вышецитированной книге Eude, в которой приводятся многочисленные документы, касающиеся французских изобретений XIX в.

Бабкок и Вилькокс в 1855 г.; на выставке 1867 г. в Париже котел этот был представлен в конструкции, близкой к современной. Общий вид котла Бабкока изображен на фиг. 133.

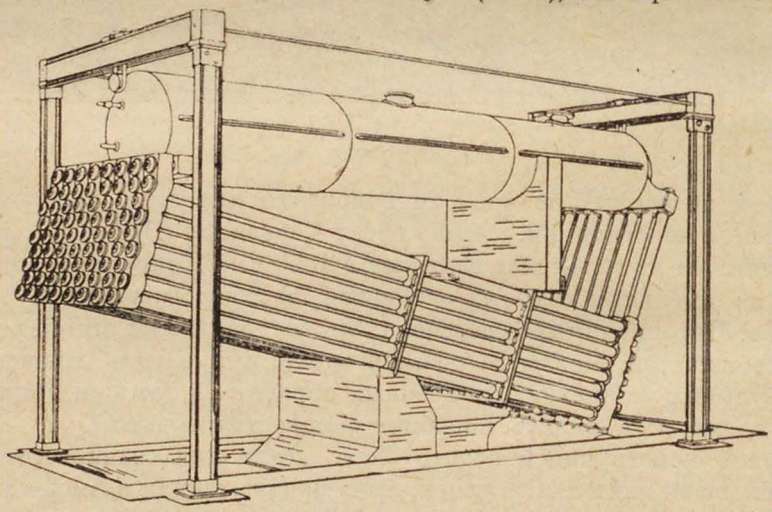


Фиг. 132

Характерной особенностью котлов Бабкока является расположение труб в отдельных секциях; он является поэтому примером «секционного» котла.

В свою конструкцию фирма Бабкок и Вилькокс вносила многочисленные изменения и усовершенствования. [1] Котлы этой фирмы и других, строящих аналогичные типы, являлись до недавнего времени самыми распространенными, в особенности на электрических станциях и на военных судах.

Почти одновременно с котлом Бабкока (с двумя группами камер) в конце 60-х годов предложен был котел Рута (Root), без верхнего барабана,



Фиг. 133

состоящий тоже из отдельных элементов. Этот котел исполнялся многими английскими и немецкими фирмами (Walther, Büttner), но впоследствии

[1] В развитии своих котлов фирма насчитывает до 20 периодов. Подробные сведения о котлах Бабкока и Вилькокса приводятся в изданиях фирмы «Steam», много раз расширявшихся и перерабатываемых.

потерял свое значение вследствие многочисленных недостатков: плохой циркуляции, слишком влажного пара и других.

На ряду с водотрубными котлами Бабкока и Вилькокса, большое значение, особенно в Германии, получили котлы с двумя камерами и верхним барабаном. Типы их чрезвычайно разнообразны. Мы приводим только один тип, именно, котел Штейнмюллера (фиг. 134).

В связи с ростом применения перегретого пара большую важность приобрели перегреватели, состоявшие из железных труб небольшого диаметра (25—30 мм). Типичное расположение перегревателей в водотрубном котле показано на фиг. 134.

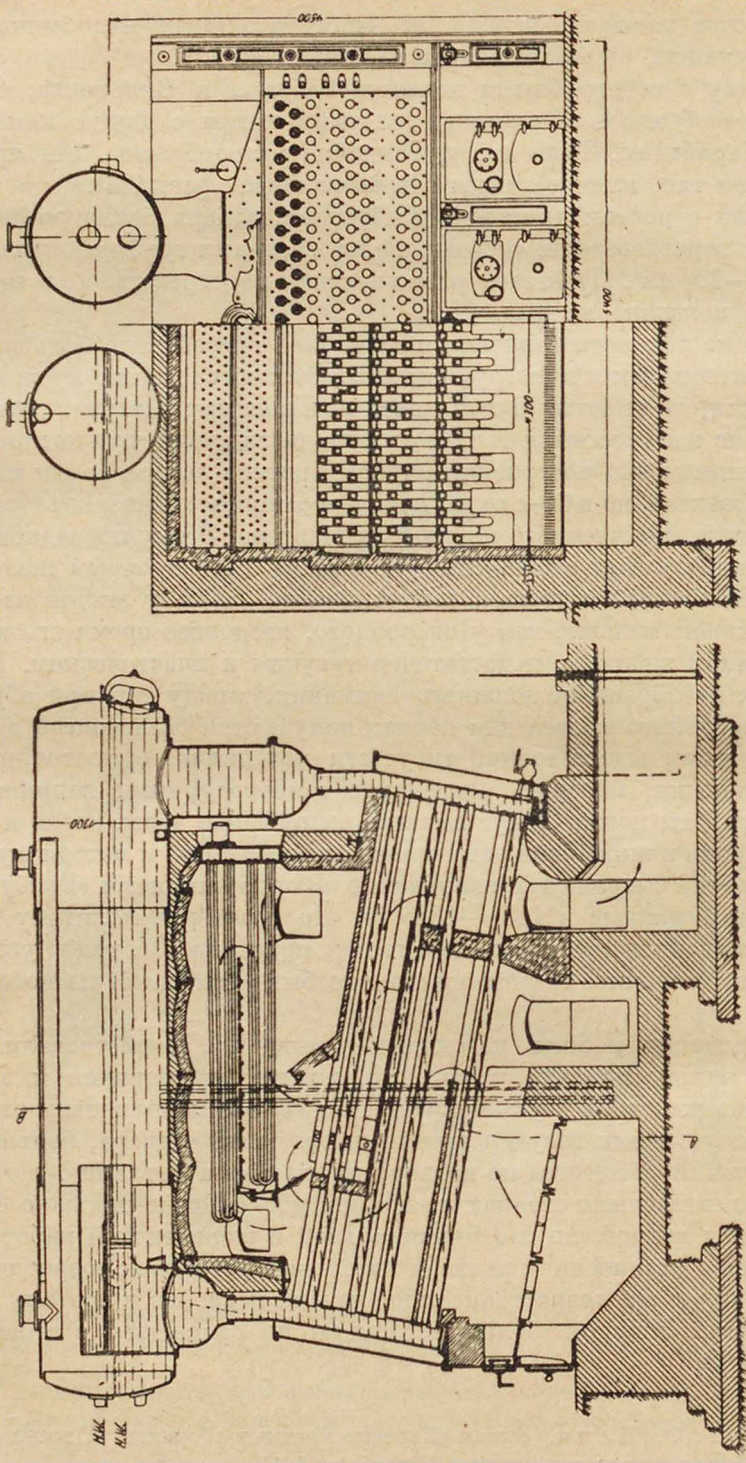
Развитие высокого давления и перегрева потребовало большого внимания к материалам и конструкции котла для обеспечения, прежде всего, безопасности его работы. Чугун почти исчезает как материал для котлостроения; из него строятся только мелкие части гарнитуры котлов. Главным материалом для построения паровых котлов долгое время являлось сварочное железо, но в 60-х годах начинается применение в котлостроении литого железа, полученного по способу Мартена. Этому последнему материалу пришлось выдержать сильную борьбу со сварочным железом за введение его в котлостроение: сопротивление разрыву листов из литого железа было не меньше, чем у сварочного, на долгое время его изготовляли слишком жестким, недостаточно тягучим и пластическим. На этот недостаток не обращали должного внимания, между тем при обработке литого и фасонного железа для котлов получаются остающиеся деформации, причем при недостаточной тягучести материала, остаются постоянные напряжения, которые, слагаясь с температурными напряжениями во время работы котла, могут вызвать разрушение части котла и взрыв. Большую роль в выработке рациональных требований к материалу и конструкции котла сыграли так называемые «Вюрцбургские» и «Гамбургские» нормы, выработанные в 1884—1885 гг. Но недоверие к литому железу продолжало держаться и дальше и только практика 90-х годов устранила его, причем сварочное железо полностью было вытеснено из котлостроения.

Безопасности работы котельных установок содействовали также введенные всюду правила испытания, освидетельствования и эксплоатации паровых котлов и установление надзора за исполнением этих правил. На ряду с этими государственными органами надзора, большое значение получили «Общества по надзору за паровыми котлами», возникшие во всех промышленных странах и которые заботились не только о безопасности работы котлов, но и о рациональной и экономичной работе.[1]

В связи с увеличением размера котельных установок возросли и размеры котлов, но это возрастание шло сначала медленно и поэтому котельные получили слишком большие размеры по сравнению с машинными помещениями.

---

[1] Проф. Г. Ф. Деппп, статья «Паровые котлы» в сборнике «Охрана жизни и здоровья рабочих в промышленности», Петербург, 1914.

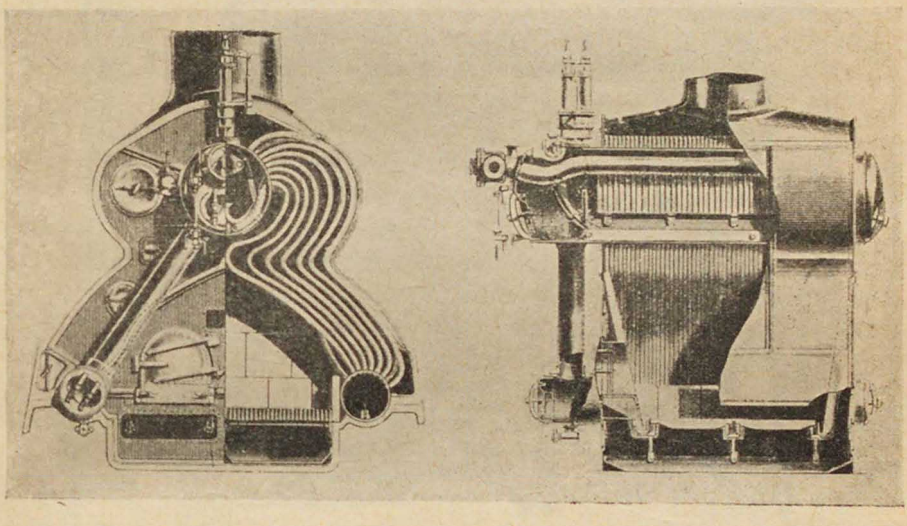


Фиг. 134

Топливом преимущественно служил каменный уголь, обслуживание топок было обыкновенно ручное. Размеры котлов постепенно повышались, но, конечно, в общем преобладали все же небольшие котлы с жаровыми трубами. Так, даже в 1902 г. котлы с жаровыми трубами составляли в Германии 49% общего числа котлов. Средняя величина поверхности нагрева медленно возрастала: в 1879 г. она равнялась 46 м², в 1904 г. 59 м². По величине поверхности нагрева котлы (общее число 47807) в 1904 г. распределялись так:

	в %
от 0 до 50 м²	51
от 50 до 100 м²	35,7
от 100 до 200 м²	10,3
от 200 и выше	3

В 90-х годах прошлого столетия начинает обозначаться, однако, крупный переворот в котельном деле: рост мощности электрических



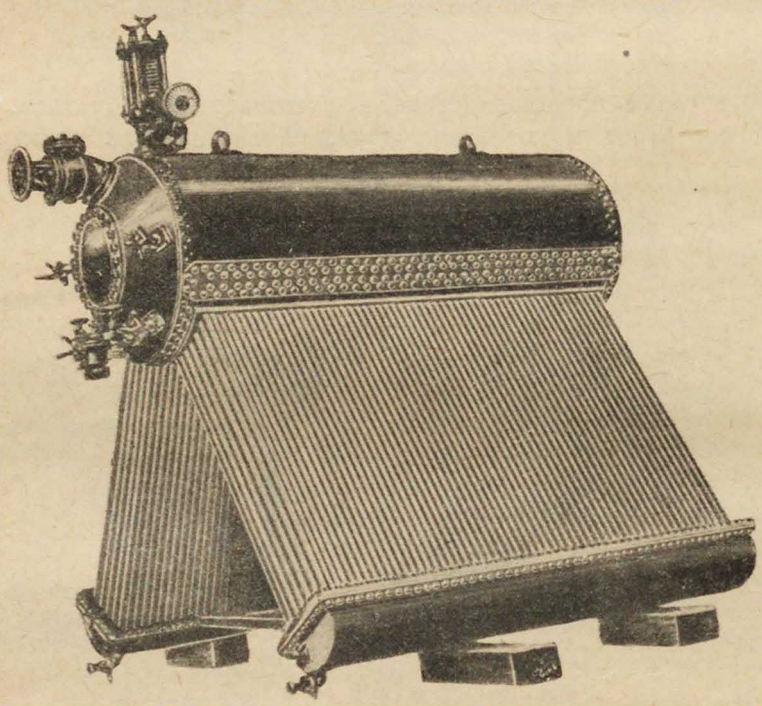
Фиг. 135

станций требовал увеличения поверхности нагрева отдельных единиц и в еще большей степени — увеличения интенсивности парообразования с одной квадратной единицы поверхности нагрева; требовалось, конечно, и повышение экономичности работы котла. Эти требования возникли не только в области стационарных паровых котлов, но и в области судовых котлов для военных судов, особенно для легких быстроходных миноносцев, у которых установки большой мощности требовалось осуществлять на небольших площадях и при малом весе. Эти требования были осуществлены прежде всего в котлах английских инженеров Торникрофта (Thornicroft) (1876—1887 г.) и Яррoу (Jarrow).

Эти котлы скоро заняли крупное место в военных судах, на ряду с котлами Бельвилля и Бабкока и Вилькокса.

Котел Торникрофта изображен на фиг. 135, а котел Ярроу — на фиг. 136.

В первом — трубы изогнутые, во втором — прямые, с сильным наклоном. Котлы Торникрофта были несколько изменены немецким инженером Шульцем в 1894 г. После длинных споров о патенте фирмаТорникрофт объединилась с фирмой Круппа, которой принадлежало право производства котлов Шульца и котлы стали строиться в Германии под названием котлов Шульц-Торникрофт, а в Англии — под названием котлов Торникрофт-Шульц. В системе как Торникрофта, так и Ярроу применяются трубы малого диаметра (наружный диаметр —36 мм). Большой наклон

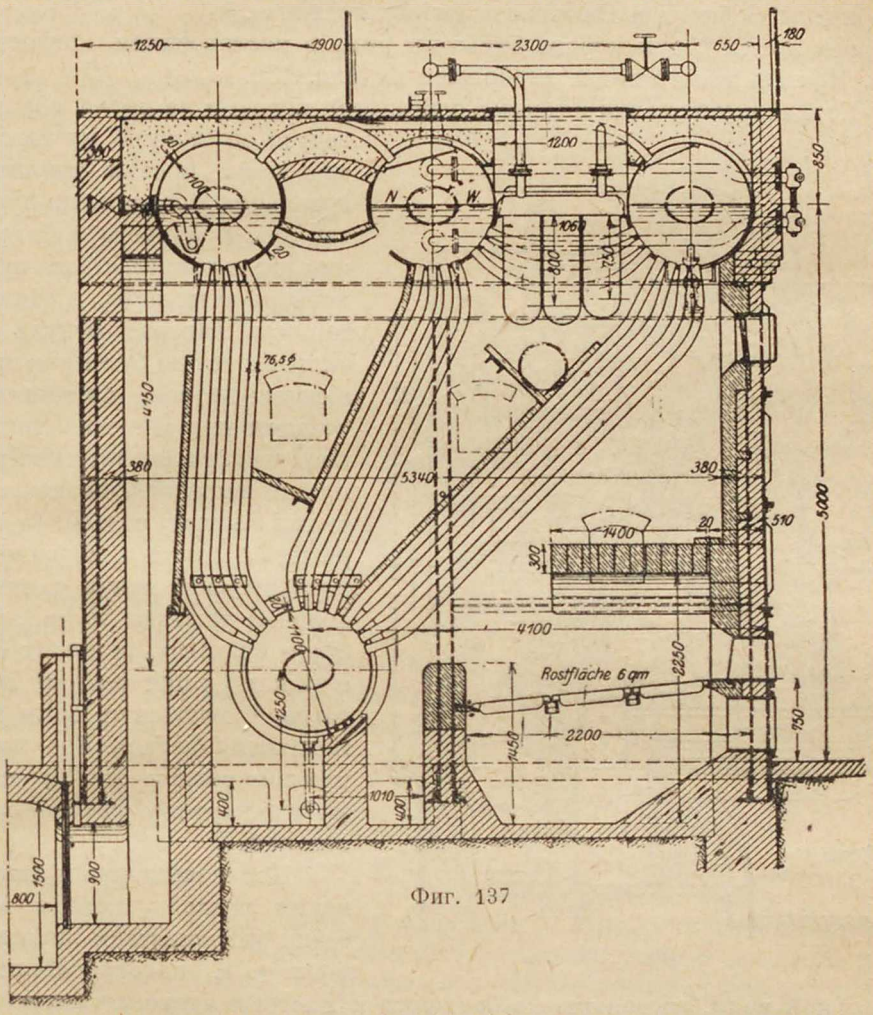


Фиг. 136

труб содействует хорошей циркуляции воды; поэтому и паропроизводительность этих котлов очень велика по сравнению с паропроизводительностью обыкновенных водотрубных котлов: в котлах Торникрофта и Ярроу съем пара достигает 50—60 кг на м^2 в час, в то время, как в обыкновенных судовых водотрубных котлах получается съем порядка 30 кг на м^2 в час. Кроме того, котлы Торникрофта и Ярроу отличаются несравненно меньшим весом и требуют гораздо меньшей площади, чем обыкновенные водотрубные котлы. Для напряженной работы в рассматриваемых котлах применяется искусственная тяга. Коэффициент полезного действия в них тоже очень высок: он доходит до 80%.

Эти котлы послужили примером для создания водотрубных котлов с усиленной циркуляцией воды для стационарных установок. Одним

из первых котлов этого типа с большим наклоном труб, для краткости называемых «вертикально-водотрубными котлами», был американский котел Стирлинга (Sterling), предложенный в 1894 г. Распространение этих котлов началось уже в 900-х годах; в Германии был предложен вертикально-водотрубный котел Гарбе. Котел Стирлинга в первоначальной конст-



Фиг. 137

рукции изображен на фиг. 137, котел Гарбе (в одной из конструкций) — на фиг. 138.

Котлы эти получили большое распространение на электрических станциях и стали строиться многими заводами. Мощность их чрезвычайно повышалась, особенно в Америке, которая заняла с этого времени ведущую роль в котлостроении: там до войны встречались уже котлы в 1000 м² и даже 3000 м². [1] В Германии довоенные котлы строились

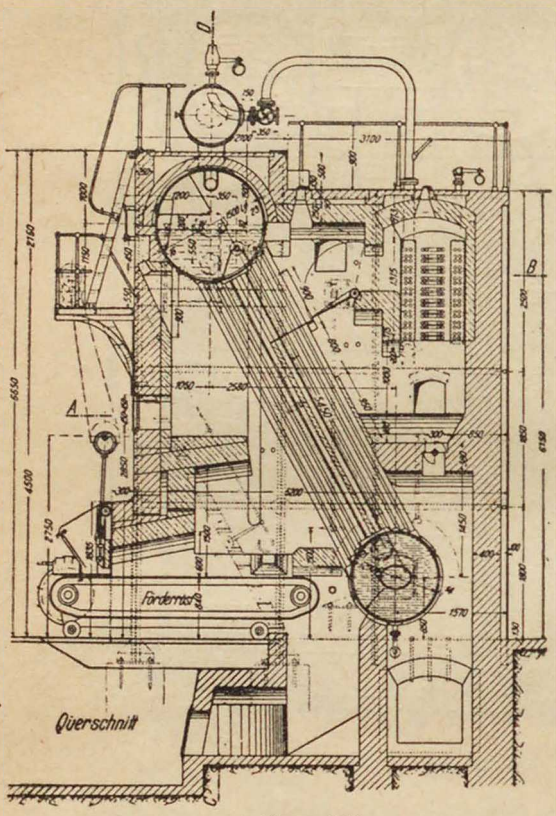
[1] Статья инженера Пламеневского. Зап. русск. техн. общ., 1913 г.

меньших размеров: особенно большие котлы постройки 1911—1914 гг. оказались не вполне удачными и в Германии распространен был в то время взгляд, что не следует итти с размерами котлов выше 1800 м. [1]

В последние годы перед войной завод Бабкока и Вилькокса стал строить новые котлы с увеличенной производительностью, так называемые котлы Бабкока и Вилькокса «морского типа». [2]

Эти котлы стали играть большую роль в послевоенном котлостроении. Пример такого котла изображен на фиг. 139.

Конечно, установки с такими огромными котлами не могли обслуживаться прежними кустарными способами подачи топлива в котельную при помощи ручных тележек и ручного забрасывания его в топки: стали применяться элеваторы, подающие топливо наверх, откуда оно скатывается по бункерам прямо в топки котлов, причем в последних перемещение топлива происходит тоже автоматически при помощи механических решеток разных систем (цепные решетки, топки с подвижными колосниками, топки с нижней подачей топлива и др.). Тяга стала создаваться в этих больших котлах при помощи дымососов, [3] очистка от золы тоже механизировалась. Все эти изменения совершенно переменили всю картину работы в котельной.



Фиг. 138

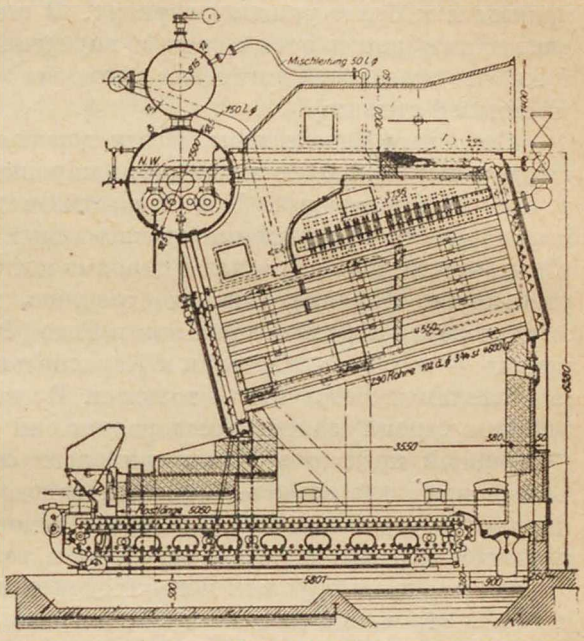
Для повышения использования тепла в котлах в них стали устраиваться экономайзеры, т. е. подогреватели питательной воды, состоящие из большого количества чугунных (экономайзер Грина), а в более позднем периоде — железных труб. Так как

[1] Мюнцингер. Котельные установки больших силовых станций. Киев, 1929 г., стр. 199.

[2] Первые сведения об этих котлах в русской литературе появились в докладе И. Ф. Бонина. Вестн. общ. технологов, 1915.

[3] См. статью инж. Ладыженского «Борьба искусственной тяги в паровых котельнях с естественной». Изв. Киевск. общ. по надзору за паровыми котлами, № 3, 5, 1913 г. и статью М. В. Кирпичева «Топки с механической тягой». Вестн. общ. технологов, 1912.

рассматриваемые котлы включали еще и большие пароперегреватели, то возникает ряд сложных проблем о распределении общей поверхности нагрева между этими тремя видами воспринимающих тепло поверхностей; возникает также ряд других вопросов о сжигании топлива в этих котлах, теплопередаче в них и т. п. Анализ этих вопросов, относящийся к эпохе непосредственно предшествующей войне, дан в статьях проф. К. В. Кирша и в статье проф. М. В. Кирпичева «Новые идеи в области паровых котлов», [1] а также в статьях Мюнцингера (Münzinger). [2]



Фиг. 139

Паровые машины и паровые котлы в России во второй половине XIX и начале XX столетий

Постройка паровых котлов и паровых машин в России продолжала развиваться во второй половине XIXвека. Обзоры, написанные по поводу русских выставок 1882 г., 1896 г. и всемирной выставки в Париже 1900 г.[3] констатируют несомненные успехи, достигнутые в этом отношении, [4] но все-таки указывают вместе с тем на причины, мешающие русскому машиностроению в области

[1] К. В. Кирш. Современные водотрубные котлы с вертикальными трубами и их успехи за последние годы. Вестн. общ. технологов, 1914.

[2] Новые идеи в технике, сборн. № 2, Петроград, 1916 г., Munzinger, Z. d. VDI, 1913.

[3] По выставке 1882 г. сведения приведены в статьях Н. Ф. Лабзина «Машины и аппараты» в сборнике «Историко-статистический обзор промышленности в России», Петербург и В. Л. Кирпичева «Машиностроение в России» (Вестник промышленности), 1883 г. По выставке 1896 г.— в статье П. К. Худякова «Машины, аппараты, машиностроение и электротехника» в сборнике под ред. В. И. Ковалевского «Производительные силы России», Петербург, 1895 г. и в отчете экспертных комиссий: «Всероссийская промышленная и художественная выставка 1896 г. в Нижнем-Новгороде, Петербург, 1897 г. По выставке 1900 г. статья проф. А. Д. Гатцука в сборнике «Россия в конце XIX века» под редакцией В. И. Ковалевского, Петербург, 1899 г.

[4] Успехи эти связаны с развитием крупной промышленности в России вообще и, в частности, с развитием потребности в паровых машинах. Данные, характеризующие это развитие за период 1875—1892 гг., приведены у В. И. Ленина «Развитие капитализма в России». Сочинения, т. III, стр. 395—396.

паровых двигателей и котлов достигнуть уровня западно-европейских. Причины эти сформулированы хорошо проф. В. П. Гриневецким в статье, касающейся предвоенного периода, [1] но эти соображения, конечно, применимы и к более раннему периоду. В статье этой говорится только о двигателях (как паровых, так и внутреннего сгорания), но многое из того, что сказано о двигателях применимо и к паровым котлам (хотя и в меньшей степени).

Основным недостатком наших дореволюционных заводов по производству двигателей (и, в частности, паровых машин) является их недостаточная специализация. Надо сказать, что этот недостаток проявлялся в особенности в отношении стационарных паровых машин. Пароходные и паровозные машины и даже паровые котлы стояли гораздо выше в этом отношении. Паровые машины строились многими заводами; некоторые из этих заводов размещены были в Риге (Фельзер, Рихард Поле, Клейн), другие — в Польше (Ортвейн и Карасинский и др.) и находились всецело под влиянием иностранной техники. Из петербургских заводов паровые машины строил завод Лесснера, но он занимался главным образом постройкой предметов артиллерийского снабжения и других изделий. Самый крупный из петербургских заводов того времени, Путиловский являлся совершенно универсальным заводом, строившим всевозможные крупные машины, а также паровозы и вагоны, артиллерию и снаряды; он же являлся и крупным металлургическим заводом. Паровые машины и котлы строились им по отдельным заказам и играли малую роль в его производстве. Другие крупнейшие русские машиностроительные заводы: Невский, Коломенский, Брянский, Харьковский, Сормовский строили судовые машины и котлы, паровозы, вагоны и другие изделия, но не стационарные паровые машины и котлы.

Московские заводы бр. Бромлей строили паровые машины как одну из специальностей, но на ряду с этим строили и насосы, и целые водопроводы, и станки. Можно еще назвать заводы Фельзера (в м. Сельце возле Сосновиц), Петербургский металлический завод, Луганский завод и Борман Шведе (в Варшаве), имевшие специальные отделения по постройке стационарных паровых котлов и завод Гретера и Криванек в Киеве, строивший паровые котлы и паровые машины, на ряду с другими аппаратами, для сахарных заводов.

В общем все же на большинстве этих заводов производство паровых машин, а отчасти и котлов, сильно уступало заграничному. В. И. Гриневецкий дает такое заключение: «общая характеристика технической организации производства тепловых двигателей у нас имеет признаки отсталости в общей постановке, значительно уступающей, благодаря меньшему производству, в устройстве и оборудовании мастерских лучшим иностранным заводам, показывает обременение черновыми цехами и оттеняет препятствия в снабжении мелкими деталями и арматурой.

[1] В. И. Гриневецкий. Русское производство тепловых двигателей. Вестн. инж., 1915.

Отсталость наших лучших предприятий в организации от передовых и иностранных можно мерять интервалом от 3 до 6 лет; для более отсталых этот интервал еще значительно увеличивается».

По поводу специально производства паровых машин то же мнение о недостаточной специализации их производства высказывает проф. П. К. Худяков: [1] «В 1896 г., несмотря на большое число паровых машин, ежегодно исполняемых русскими машиностроительными заводами, дело это нельзя считать у нас поставленным основательно, ибо на большинстве заводов специализация производства совершенно отсутствует, почти все машины исполняются по специальным заказам, по новым моделям, по новым проектам».

На пути к надлежащей постановке производства стационарных паровых машин и котлов было много препятствий, но главным являлась конкуренция иностранных заводов, иногда подавлявшая русскую промышленность в этой области даже не качеством и дешевизной своих изделий, а влиянием иностранных капиталов, господствовавших во многих отраслях русской обрабатывающей промышленности. Так, в области текстильной промышленности от самого ее возникновения до конца 80-х годов господствовали иностранные капиталы и все оборудование ставилось английское, в том числе паровые машины и котлы сначала английского завода Гик-Гиргрива, а затем Мозгрева.

Те и другие были ко времени своей установки совершенно устарелых типов и постановка их объясняется исключительно влиянием конторы Кнопа, финансировавшей русские тектильные заводы того времени. [2] Позже господство английских двигателей и котлов сменилось в области текстильной промышленности влиянием швейцарских и немецких фирм: постановка машин Зульцера на текстильных фабриках являлась для их хозяев своеобразным «вопросом чести» и влияла на их кредитоспособность.

В области южной металлургии, развившейся на французские и бельгийские капиталы в 90-х годах прошлого столетия, большое значение имели двигатели, поставлявшиеся заводами этих стран.

Но особенно задерживающее влияние для постройки русских паровых машин и котлов имело господство иностранных капиталов в области электрических станций: крупные станции принадлежали по большей части германским капиталистам и оборудовались немецкими машинами и котлами. Между тем, именно требования электротехники оказали, как мы видели, сильное влияние на развитие паровых машин и котлов в 80-х и 90-х годах XIX столетия. Поэтому в эту эпоху замечается особенное

[1] В вышецитированной статье в сборнике «Производительные силы России».

[2] См. статью «Контора Кнопа и ее значение», Вестн. общ. технологов, 1895 г., на которую мы уже ссылались. Характерным признаком влияния английских деловых кругов на русские даже в 1895 г. является то, что статья эта (произведшая в свое время большую сенсацию) появилась анонимной. Автором ее является (по устным сообщениям) инженер-технолог О. Сонгин, крупный специалист по постройке текстильных фабрик.

отставание русских паровых машин от заграничных. Хотя отдельные машины строятся и большой мощности и хорошего исполнения, но эти большие машины предназначаются все же не для электрических станций, а для заводов, иногда даже текстильных фабрик, как, например, машина в 1500 л. с. с канатной передачей, построенная заводом Лесснера, описанная в курсе паровых машин, изданном под ред. Г. Ф. Деппа.

Относительно же типа быстроходных машин, имевшего заграницей такое крупное значение в 80-х и начале 90-х годов, мы имели для русских заводов следующий отзыв проф. А. Д. Гатцука: [1]

«Машины скороходные для электрических станций тоже строятся, но дело это нельзя считать вполне установившимся и много машин этого типа ввозится из-за границы».

Эти вышеуказанные неблагоприятные условия особенно чувствительно отразились также на оригинальности изготовляемых машин и котлов: русские заводы не могли тратить больших средств, необходимых для конструктивной разработки, производства опытов и налаживания специального технологического процесса для самостоятельно разработанных типов. Поэтому русские заводы строили преимущественно те или иные иностранные типы, вводя иногда те или иные улучшения.

Так, Петербургский металлический завод строил паровые котлы сначала типа Бабкок и Вилькокс, а перед войной начал строить котлы типа Гарбе, с некоторыми самостоятельными изменениями.

Быстроходные паровые машины, исполнявшиеся на заводах Лесснера, Фельзера и Рихарда Поле, все были немецких типов с поршневыми золотниками и плоскими регуляторами и т. д. Относительно стационарных паровых машин надо еще заметить, что производство их с 1900 г. совершенно замирает: по расчетам проф. В. И. Гриневецкого [2] с 1900 по 1908 г. производство постоянных паровых машин упало в три раза, а затем и до войны держалось на этом низком уровне.

Из самостоятельных котельных конструкций надо упомянуть только о котле системы В. Шухова: это секциональный водотрубный котел, причем трубы соединяются в отдельные элементы, которые дальше комбинируются между собой и с барабаном. Разрез такого котла приведен на фиг. 140.

Эти котлы очень удобны по приспособленности к серийному производству, которое и было поставлено на заводе Бари в Москве.

Котлы этой системы получили большое распространение.

Другой системой котлов, представляющей известную оригинальность, были котлы, исполненные на заводе Фицнер и Гампер. Разрез такого котла представлен на фиг. 141.

Из паровых машин приводим только одно изображение клапанного парораспределения системы Бромлея (см. фиг. 142).

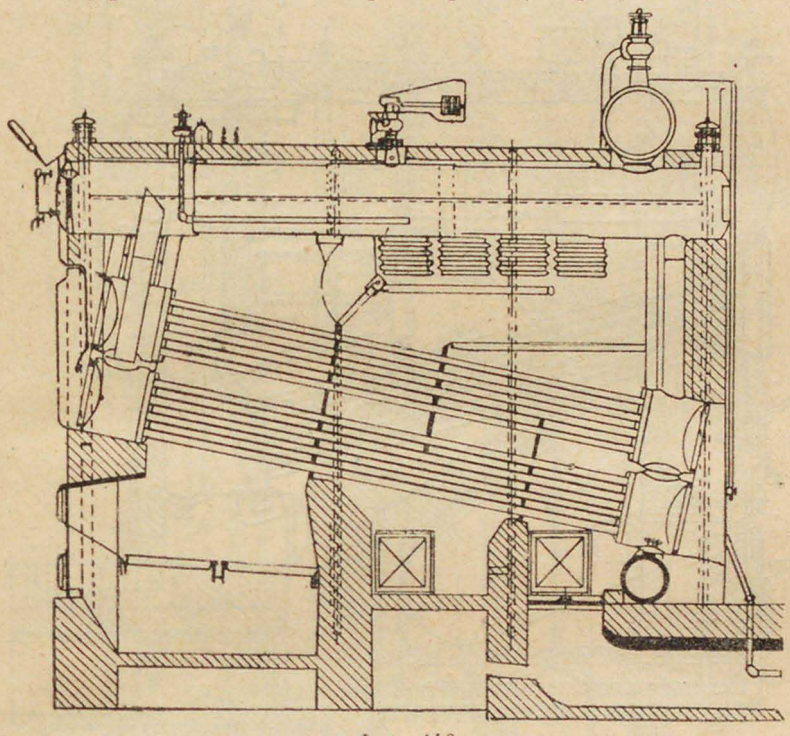
---

[1] Россия в конце XIX века. Петербург, 1899. статья проф. А. Д. Гатцука, стр. 280—308.

[2] Вестн. инж., 1915, стр. 122.

Машина с этим парораспределением была изготовлена для всемирной выставки в Париже в 1900 г. и имела там большой успех.

Мы уже говорили, что гораздо более основательно было поставлено производство паровозов и судовых паровых машин. В нашу задачу не входит составление полного обзора паровозостроения в России, но нельзя не указать, что в этом отношении было достигнуто почти полное освобождение от иностранного ввоза. Крупные усовершенствования, вводимые за границей (применение двойное расширения, перегрев пара, даже применение прямоточной машины) быстро находили осуществление в русской практике. Так, еще в восьмидесятые годы управлявший тогда службой тяги Юго-Западных дорог инж. А. П. Бородин производил самостоятельные исследования вопроса о применении паровых рубашек и системы компоунд в паровозах. [1]



Фиг. 140

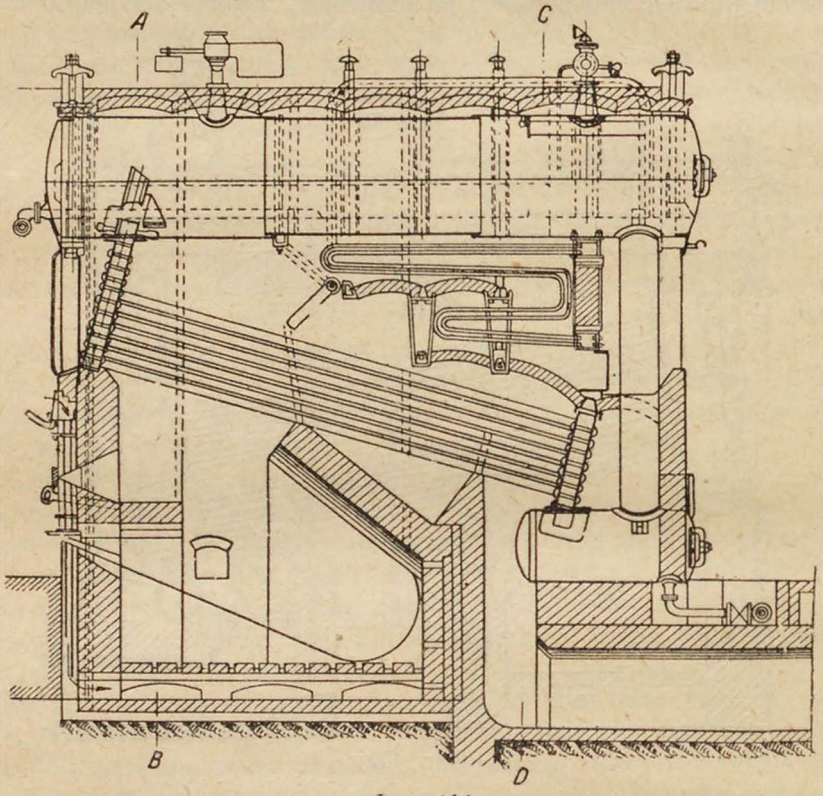
К началу 90-х годов Юго-Западными дорогами и Владикавказской жел. дор. были выработаны самостоятельные типы компоунд-паровозов, а в 1893 г. выработан был тип «нормального» товарного компоунд-паровоза. [2] Хотя этот тип имел крупные недостатки и подвергался некоторым

[1] Исследования А. П. Бородина печатались в издаваемом им в Киеве журнале «Инженер». Они переведены на французский язык и изданы отдельным изданием.

[2] История введения «нормального типа» товарного паровоза, его изменений и опытное исследование изложены в книге Ю. В. Ломоносова «Опытное исследование товарных паровозов компаунд нормального типа», Киев, 1907 г.

изменениям (типы 1897 и 1901 гг.), все же введение его дало возможность паровозостроительным заводам поставить крупно-серийное производство.

Паровозы с перегретым паром вводились у нас с начала 900-х годов: пассажирские паровозы Московско-Казанской ж. д. 1902 г., товарные паровозы системы Маллета Московско-Казанской жел. дор. 1905 г., пассажирские паровозы Коломенского и Брянского заводов 1906—1907 гг. [1] и др., а затем перегретый пар стал применяться, как правило, в паро-



Фиг. 141

возах, построенных в России (как пример типа пассажирского паровоза — тип 1—3—1 Сормовского завода). [2]

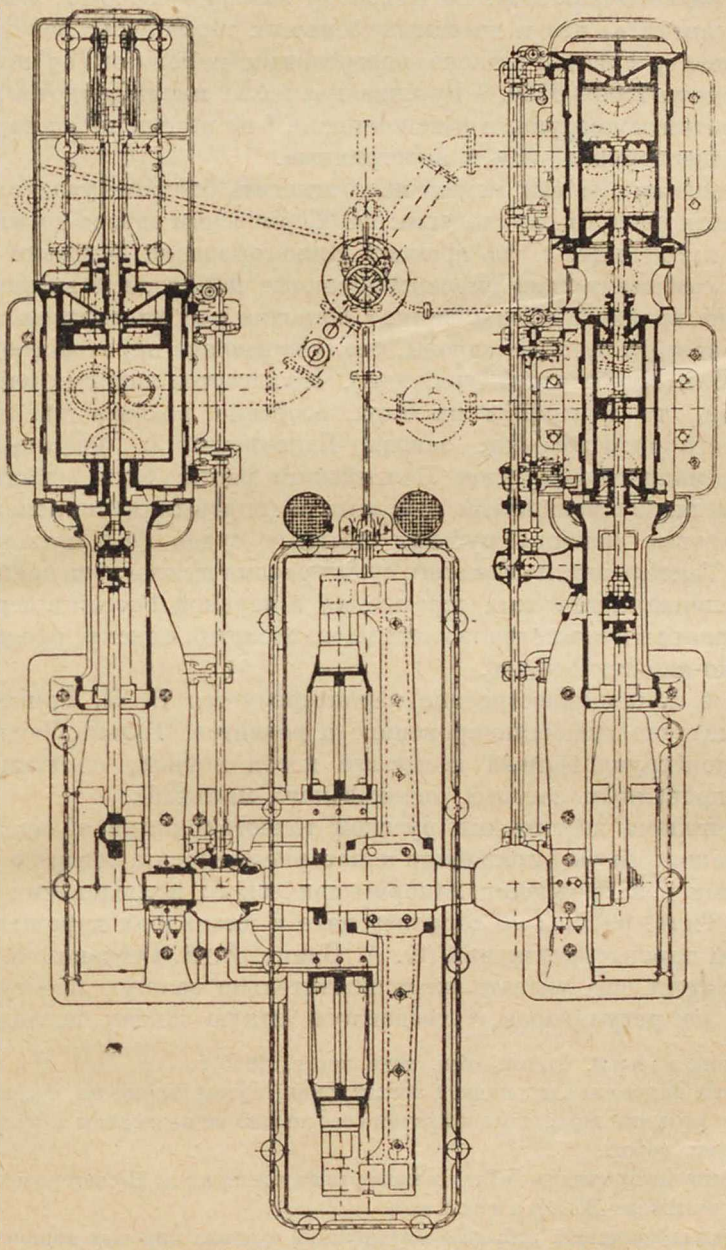
Наконец, первая попытка построения паровозов с прямоточной паровой машиной была сделана по инициативе инженера Нольтейна на Коломенском машиностроительном заводе для Московско-Казанской жел. дор., о чем упоминает сам проф. Штумпф в предисловии к первому изданию своей книги. [3]

[1] Тип паровоза Брянского завода 1909 г. описан в статье инж. А. Мочана. Вестн. общ. технологов, 1910.

[2] См., например, статью С. И. Михина о паровозе Сормовского завода типа 1-3-1, Вестн. технологов, 1911 г., а также статью инж. Е. Е. Нольтейна «Новейшие типы товарных паровозов российских железных дорог». Вестн. инженеров, 1915 г.

[3] Stumpf. Die Gleichstromdampfmaschine, Berlin, 1911.

Таким образом , в области паровозов мы не видим такого отставания, как в области стационарных паровых машин. Хотя заказы на паровозы



Фиг. 142

поступали очень неравномерно и паровозостроительные заводы часто оказывались в затруднительном положении и даже испытывали иногда банкротство (как, например, Невский завод), но все же, в общем, вследствие развития железнодорожной сети и интенсивности движения, количество

построенных паровозов на отдельных заводах было велико. Так, например, имеются юбилейные издания по Путиловскому заводу по поводу постройки 4000-го паровоза, по Невскому заводу — 3000-го; для сравнения надо заметить, что и на самых больших германских заводах (Борзинг, Геншель, Ганомаг) число построенных паровозов не превышало к тому времени 7500—8000. [1] Русские паровозы имели, конечно, различные недостатки конструкции и исполнения, [2] но по основным параметрам были того же порядка, как и иностранные.

В отношении судовых машин надо отметить большие успехи, сделанные в области речного пароходства: на Сормовском заводе во второй половине 90-х годов (т. е. ко времени Нижегородской выставки 1896 г.) строились самостоятельно спроектированные пароходные машины двойного и даже тройного расширения; [3] большие успехи сделали и другие волжские заводы, а также заводы, обслуживающие пароходство на Каспийском море (Курбатова, Журавлева). Что касается паровых машин морских судов, то постройка их была особенно развита для потребностей военного судостроения: заводы Балтийский и Франко-Русский, строившие машины для судов Балтийского флота, были действительно хорошо специализированными заводами и (опять-таки) по основным заданиям паровые машины русских военных судов не уступали заграничным. [4] Такое развитие военного судостроения вызывалось крайним усилением империалистических стремлений в царской России в период 90-х годов прошлого и первых годов настоящего столетия в эпоху, предшествующую русско-японской войне.

Русское локомобилестроение характеризуется В. И. Гриневецким [5] как недостаточно специализированное и развитое. Только Людиновский завод, реконструированный незадолго перед войной, являлся хорошо специализированным заводом европейского масштаба.

Относительно достижений русской теплотехники в области теории паровых машин мы уже приводили некоторые сведения, говоря о работах, исполненных в направлении калориметрического исследования (Вышнеградский, Тиме, раборы по теплопередаче в цилиндрах паровых машин) и в области парораспределений (Ф. А. Брике, А. В. Гречанинов, В. Карташов). Следует еще указать на исключительно важную работу Вышнеградского по регуляторам, [6] создавшую целую школу исследователей

[1] Павловский. Вестн. общ. технологов. 1915 г.

[2] Многие паровозы заграничной конструкции, поставляемые на русские дороги, также имели крупные недостатки и притом совершенно не подходили к условиям русских железных дорог.

[3] См. вышецитированные «Труды экспертных комиссий по Нижегородской выставке», статью инженера В. Афанасьева.

[4] Чрезвычайно ценное собрание конструкций судовых паровых машин для военного флота, исполненных русскими заводами, имеется в сочинении проф. Мадисова.

[5] В вышецитированной статье (Вестник инженеров, 1915).

[6] И. А. Вышнеградский. О регуляторах прямого действия. См. также «О регуляторах непрямого действия». Изв. Технол. инст.

(П. В. Котурницкий, Грдина, А. В. Гречанинов, А. И. Сидоров, К. Э. Рерих).

О русских работах в области паровых котлов мы будем говорить в связи с послевоенным развитием котлостроения в СССР.

Большое количество важных работ посвящено паровозным машинам; в этой области работал целый ряд выдающихся специалистов: проф. Ераков, Романов, Н. П. Петров, Н. Л. Щукин, А. П. Бородин, Н. К. Антошин, С. И. Смирнов, Леви, Е. Е. Нольтейн, Ю. В. Ломоносов, А. С. Раевский, М. В. Гололобов и др. — перечень и характеристика этих работ выходит за пределы нашей задачи. [1]

[1] Относительно деятельности инженеров-технологов, окончивших Петербургский технологический институт, в области теплотехники и паровозостроения сведения имеются в юбилейном сборнике, написанном к столетию этого Института (1928), т. II.

Глава IV

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ПЕРВЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Первые попытки создания двигателей внутреннего сгорания

История двигателей внутреннего сгорания начинается с очень ранней эпохи, именно — с опытов Готфейля, а затем — Гюйгенса и Папина, о которых мы уже говорили. Но эти попытки не имели успеха и не могли иметь его, и более реальные попытки создания двигателей внутреннего сгорания начинаются только в самом конце XVIII столетия. [1] В 1791 г. в Англии взят был патент (№ 1833, 1791 г.) Барбером (Barber) на двигатель, который должен был работать горячими газообразными продуктами, получающимися при сгорании газов, выделяющихся помощью сухой перегонки из дров, угля или масла в закрытой реторте. Двигатель свой Барбер представлял в виде вращающегося колеса, на лопатки которого должны были действовать горячие газы (смешанные с водяным паром); таким образом, предложение Барбера является по существу одним из первых предложений газовой турбины.

Первое предложение поршневого двигателя внутреннего сгорания было сделано Стритом (Street) (английский патент № 1983, 1794 г.). Двигатель предполагался состоящим из цилиндра, на дно которого наливалась какая-либо летучая жидкость (терпентин, спирт); вследствие нагревания

---

[1] Исторический очерк развития двигателей внутреннего сгорания входил во все прежние сочинения по этим двигателям. По полноте и точности изложения этого развития выделяются следующие сочинения:

D. Clerk. The Gas, Petrol and Oil Engine, London, 1910 (книга эта издавалась с 1886 г.).

Schöttler. Die Gasmaschine. Braunschweig, изд. 1899 г. (издание 1909 г. в этой части не отличается от издания 1899 г.).

B. Donkin. A Text Book on Gas, Oil and Air Engines, London, 1900.

Aimé Witz. Traité théorique et pratique des moteurs à gas et à pétrole, t. I—II, 4-me édit., Paris, 1903, 1904 гг.

Aimé Witz. Dernière évolution du moteur à gas, Paris, 1910.

H. Güldner. Das Entwerten und Berechnung der Verbrennungsmotoren und Kraftgasanlagen, 3 Aufl., Berlin, 1914.

Новейшая работа (касающаяся, главным образом, двигателей, работающих на тяжелом жидком топливе): Evans «History of the Oil Engine», London, 1934 г.

дна жидкость испарялась и смешивалась с воздухом; горючая смесь воспламенялась и подбрасывала поршень, который соединялся с рычажной передачей к насосу.

Следующим по времени предложением является предложение французского инженера Лебона (Lebon), известного изобретателя светильного газа. В первом патенте 1799 г. (28 сентября) он описывает получение светильного газа, во втором патенте, представляющем дополнение к первому (1801 г.), он предлагает сжимать газ и воздух отдельными насосами и смешивать их в особой камере. Смесь эта воспламеняется в цилиндре двигателя и приводит в движение поршень. Воспламенение предполагается совершающимся от электростатической машины, насосы и цилиндр — двойного действия. Но Лебон (как и предыдущие изобретатели) не разрабатывал дальше своего изобретения и не сделал попыток осуществить его; в 1804 г. он окончил жизнь самоубийством.

В 1820 г. появляется сведение об исполненной попытке устройства газового двигателя, принадлежащей англичанину Сесилю (Cecil); он воспламенял под поршнем смесь водорода с воздухом, вследствие чего поршень подымался на большую высоту, при охлаждении же под поршнем получалось разрежение и давление атмосферного воздуха опускало поршень, совершая работу.[1] Таким образом, предложение это предвосхищает идею атмосферной машины Отто Лангена, исполненной в 1867 г. Эта же идея получения разрежения вследствие взрыва и применения воздуха для получения работы лежит в основе предложения Броуна (S. Brown), патенты которого относятся к 1823 г. (№ 4774) и 1826 г. (№ 5350). Было сделано несколько попыток осуществить изобретение Броуна и применить его двигатели как в виде стационарных машин, так даже к передвижению повозки и небольшого судна. Несмотря на некоторые достигнутые успехи, двигатели Броуна не вошли в практику.

К той же эпохе начала прошлого столетия относятся работы Ньепса над изобретением двигателя внутреннего сгорания. Они стоят вне рассматриваемого ряда предложений: Ньепс предлагал для работы двигателя впрыскивание порошка ликоподия и воспламенение его электрической искрой. Предложение это не имеет практического значения, но заслуживает быть отмеченным вследствие интересных замечаний, сделанных по его поводу С. Карно, [2] в которых высказаны идеи об устройстве двигателя внутреннего сгорания, до известной степени совпадающие с позднейшими предложениями Дизеля.

Дальнейшие английские предложения двигателей внутреннего сгорания делаются все более и более разработанными, и авторы их опять возвращаются к идее настоящих газовых двигателей, работающих при давлениях выше атмосферного, а не в области разрежения, как у Броуна.

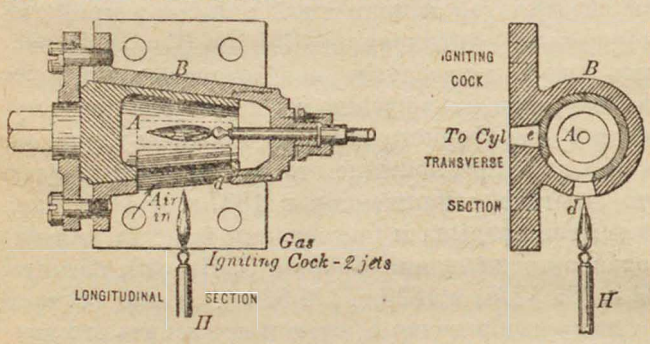
[1] Описание этого предложения имеется только в книге Clerk.

[2] С. К а р н о. Размышления о движущей силе огня. См. сборник «Второй закон термодинамики», стр. 58—59. Сведения об изобретении Ньепса вообще крайне скудны, и в вышеназванных общих сочинениях по двигателям внутреннего сгорания о нем не упоминается.

Не входя в подробности, скажем только, что в предложении Райта (Wright 1833 г. патент № 6525, двигатель двойного действия) впервые введено и специально оговорено охлаждение цилиндра посредством водяной рубашки. Особенной разработкой отличаются предложения Барнетта (W. Barnett), сделанные в 1838 г. (патент № 7615). Он предложил три конструкции, схожие по принципу действия.

Двигатель Барнетта — двойного действия; он имеет кроме главного цилиндра еще 2 цилиндра простого действия для сжатия газа и воздуха; сжатие смеси заканчивается в рабочем цилиндре. Это введение сжатия перед взрывом является чрезвычайно важным, так как оно необходимо для экономичной работы двигателя, но фактически оно было применено впервые только в позднейшем двигателе Отто (1878 г.).

Из деталей двигателя Барнетта заслуживает быть отмеченным зажигание посредством пламени, соединяемом в нужный момент с внутренностью цилиндра помощью вращающегося крана (фиг. 143).



Фиг. 143

В дальнейшем, до 1860 г., появляется ряд английских патентов, не заключающих особенной новизны. Заслуживают быть отмеченными только предложения Барзанти и Маттеучи (1854 г. и 1857 г.).

В обоих этих предложениях проводится идея атмосферной машины, но поршень свободно двигается вверх, давая возможность полного расширения газов, что содействует экономичности процесса. Предложение этих изобретателей 1857 г. изображено на фиг. 144.

Поршень снабжен зубчатой полосой, сцепляющейся зубчатым колесом *D*, свободно насаженном на оси. При движении вверх колесо просто вращается на оси, не производя работы. При движении вниз собачка, соединенная с колесом — производит зацепление и приводит в движение главную ось машины и маховое колесо. Эта идея вполне схожа с позднейшим предложением Отто-Лангена 1867 г.

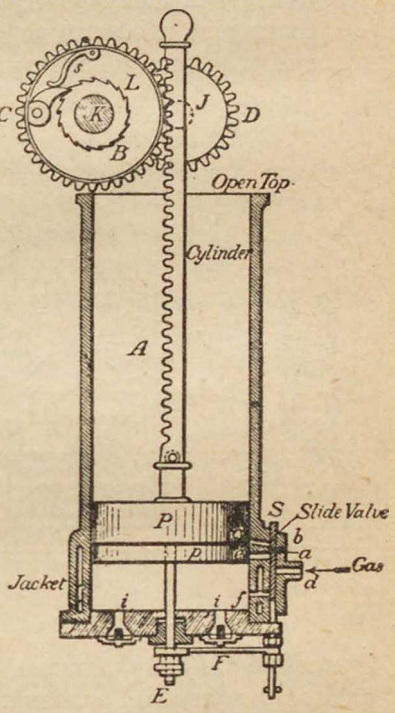
Машина Ленуара

Большое количество предложений двигателей внутреннего сгорания, сделанных в первой половине XIX века, указывают на реальную потребность в таком двигателе. Потребность эта хорошо охарактеризована Чевертоном (Cheverton) еще в 1826 г.: [1] «в практической механике давно уже

[1] Donkin. Цит. соч., стр. 27.

являлось желательным иметь двигатель, который был бы готов к работе в каждый момент, так что его можно было бы привести в движение без потери времени и без затраты излишних средств на его работу. Эти качества делали бы его пригодным в случаях потребности в малой мощности и притом только по временам применяемой. Эти случаи чрезвычано многочисленны, и сбережение человеческого труда было бы так велико, что выгоды, приобретенные обществом, были бы значительны, даже если бы текущие расходы оказались гораздо большими, чем при паре».

Таким образом уже в 1826 г. чувствовалась потребность в двигателе малой мощности для предприятий мелкой промышленности, испытывавшей сильную конкуренцию со стороны крупных предприятий. Тогдашняя тяжелая балансирная машина с огромными паровыми котлами для этой цели совершенно не годилась. Даже и позднее развившиеся ломокобили были слишком громоздки и не подходили для установки вблизи жилых помещений. Только значительно позже (уже спустя много лет после создания газовых двигателей) были предложены некоторые типы специально малых паровых двигателей, соединенных с небольшими водотрубными котлами: конструкции многих таких двигателей (преимущественно 80-х годов) описаны у Кноке. [1] Но двигатели эти к тому времени являлись уже запоздалыми и успеха не имели, хотя некоторые из них (например, двигатели «Фридрих») еще рекламировались в немецких журналах.



Фиг. 144

В 50-ые годы эта потребность в создании двигателя, отличающегося от паровой машины в указанных отношениях и не нуждающегося в паровом котле, чувствовалась особенно сильно во Франции с ее развитой мелкой промышленностью. К этому времени выяснилась уже плохая утилизация тепла в паровой машине и неудача попыток создания двигателей, работающих нагретым воздухом.

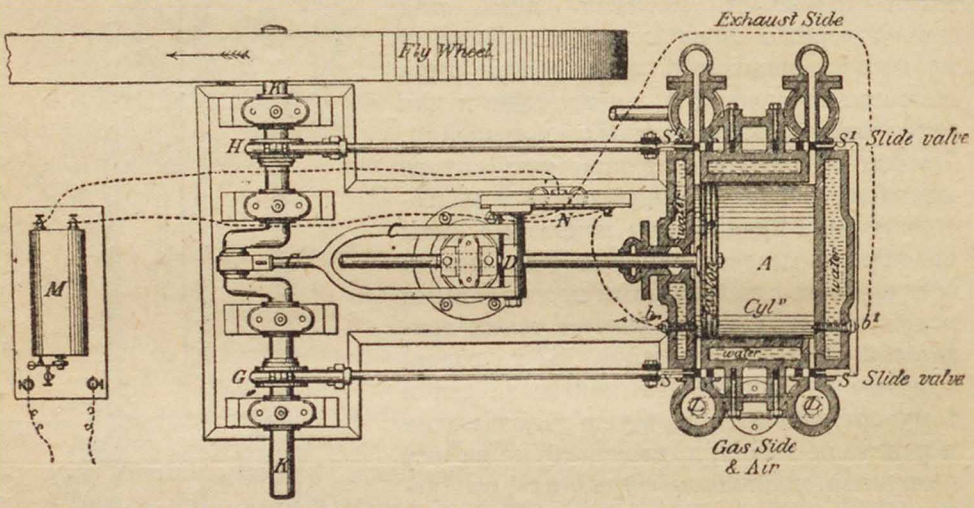
Все эти обстоятельства подготовили почву для газового двигателя Ленуара (Lenoir) во Франции. Французский патент на эту машину был выдан 24 января 1860 г., но она строилась уже раньше заводом Маринони (Marinoni) в Париже. Оригинальность изобретения Ленуара

[1] Knocke. Kraftmaschinen des Kleingewerbes, 2 Aufl., Berlin, 1899, стр. 479 и след. Некоторые другие конструкции мелких паровых двигателей (иностранных заводов Танги, Вестингауз, русских — завод Нобеля, Ортвейна и Карасинского) приведены в книге Д. Голова «Двигатели малой силы», Петербург, 1894.

возбуждала большие споры: Гугон (Hugon) — директор Парижской газовой компании оспаривал патент Ленуара на основании собственного патента на газовый двигатель от 11 сентября 1858 г., Рейтман (Reithman) — часовщик в Мюнхене, доказывал, что он уже строил газовые двигатели в 1858 г. Повидимому, Ленуар пришел к своему изобретению независимо от этих конкурентов, но мы видели, что и раньше предлагался целый ряд конструкций газовых двигателей, так что вопрос о первенстве не может быть разрешен и не представляет особенного значения. Ленуару, во всяком случае, принадлежит заслуга введения двигателей внутреннего сгорания в практику и привлечение к этому вопросу внимания широких технических кругов.

Двигатель Ленуара изображен на фиг. 145.

Двигатель двойного действия, работает без сжатия. Всасывание происходит от начала до середины хода, когда происходит взрыв от спирали



Фиг. 145

Румкорфа *(M)*. Охлаждение цилиндра — водяное. Впуск и выпуск управляются отдельными золотниками s и s , приводимыми в движение эксцентриками G и H.

Несколько другая конструкция дана в статье Треска, [1] французского ученого, который занимался опытным исследованием двигателя Ленуара.

Работа двигателя Ленуара происходила плавно и довольно надежно; пуск в ход не представлял особенных затруднений в виду отсутствия сжатия.

Двигатель этот, отвечавший, как было указано, реальной экономической потребности момента, возбудил чрезвычайно преувеличенные ожидания: приводились совершенно фантастические данные об экономичности работы двигателя Ленуара и высказывались мнения о скором вытеснении им паровой машины. На самом деле расход светильного газа (для работы на котором был построен двигатель Ленуара) оказался равным от 2,5

[1] E u d e. Exposition rétrospective de la mécanique, Paris, 1900, стр. 40—42.

до 3 м³ на эффективную л. с. ч., как это показали опыты Треска на небольшой машине мощностью в 1,02 эфф. л. с. В этом опыте Треска получился расход газа в 2,878 м³ на эфф. л. с. ч. [1] при теплотворной способности этого газа в 6770 кал/м³. Это дает полный экономический коэффициент полезного действия, равный $\frac{632,3}{6770 \cdot 2,878}=0,033$, т. е. гораздо меньший, чем тогдашних паровых машин. Стоимость получения силы (в денежном выражении) оказывалась при этом гораздо выше, чем в паровых машинах (очевидно, большей мощности). Однако, для мелкой промышленности во многих случаях выгодно было даже переплачивать на стоимости получения работы [2] посредством газового двигателя в виду его других качеств: отсутствия котла, быстрого пуска в ход и т. д.

Двигатели Ленуара, несмотря на доказанную высокую стоимость получения энергии, получили заметное распространение во Франции, и оказали заметные услуги некоторым предприятиям мелкой промышленности, но, конечно, не произвели того крупного экономического переворота в направлении обратного движения в сторону разукрупнения крупной промышленности, который ожидался некоторыми писателями. Мнение об этой возможной роли двигателей малой мощности часто высказывалось и позже. Особенное значение стали придавать этому вопросу в Германии в 70-ые и 80-ые годы, когда развитие рабочего движения, непрерывно нараставшего в ряде стран, начиная с 1848 г., встревожило многих буржуазных ученых и заставило их надеяться на какое-либо изобретение, которое могло бы задержать развитие крупной промышленности (и связанного с ней рабочего движения) или, еще лучше, вызвать возвращение к развитию мелкой промышленности и ремесленной организации труда домашнего замкнутого характера, препятствующего объединению рабочего класса и развитию в нем сознания солидарности и стремления к социальному перевороту. Так, один из немецких писателей высказывал следующее мнение о роли мелких моторов: «благодаря мелким моторам нам предстоит эпоха преобразования в обратном направлении, эпоха децентрализации. Примерно за последнее полустолетие мы наблюдали, как мелкое производство теряло занятую им область в пользу крупной промышленности, которая шаг за шагом вытесняла его из одной отрасли производства за другую: в лежащий перед нами век мы будем свидетелями противоположного процесса». [3]

Особенной известностью в этом отношении отличаются мнения Рело (Franz Reuleaux). Уже в 1875 г. в первом томе своего знаменитого сочинения о кинематике машин он высказался в этом смысле, а затем много раз возвращался к этому вопросу. Так, например, в статье, напечатанной

[1] В статье Треска, помещенной в «Bulletin de la Société d'Encouragement», стр. 577, 1861 г. приводится расход светильного газа в 2,7 м³ на л. с. ч.

[2] Треска говорит о стоимости получения силы посредством газового двигателя, равной 0,80 франка на л. с. ч.

[3] Joll, Die wichtigsten Kleinkraftmaschinen (1870). Цитирую по Зомбарту «Современный капитализм», т. II, стр. 434.

в 1879 г., он пишет: «если мелкому производству доставить силу природы по таким же дешевым розничным ценам, как ее добывает капитал par excellence посредством паровой машины, то конкуренция снова становится возможной: небольшому капиталу сделается доступным пропорциональное его силе участие в благодеяниях машины» [1] и т. д.

Эти мысли разделялись целым рядом крупных техников и экономистов в 80-х и 90-х годах прошлого столетия. Развитие электротехники дало новый толчок появлению аналогичных надежд; они стали только переноситься с двигателя внутреннего сгорания на электромотор. В этом отношении характерное название носит одна из статей рассматриваемого направления: «Электротехника — спаситель ремесла».

Действительное развитие промышленности, разумеется, не только не подтвердило этих предсказаний, но пошло как раз по противоположному пути: развитие электротехники дало, напротив, толчек к новому развитию концентрации промышленности, причем размеры ее становились, по выражению Энгельса,[2] таковы, что начинали «перерастать руководство буржуазии».

Но даже в более ограниченной области получения механической энергии посредством мелких двигателей внутреннего сгорания прямые расчеты, сделанные, например, Эберла (Eberle),[3] показывают, что крупные двигатели всех типов сохраняют свое преимущество и дают возможность получать более дешевую энергию. Так, например,[4] при 10-часовом рабочем дне и 300 рабочих днях в год газовый двигатель при различной стоимости газа дает колебания в стоимости одной л. с. ч. от 9,96 до 15,96 пфеннигов, тогда как паровая машина с конденсацией, работая при тех же условиях, дает в зависимости от цены угля стоимость одной л. с. ч., колеблющуюся между 5,63 и 7,42 пф.

Таким образом, ни двигатели Ленуара, ни другие, более экономичные двигатели внутреннего сгорания, о которых мы будем говорить ниже, не могли вызвать регрессивного движения в области развития промышленности: эти двигатели давали только возможность держаться некоторым отдельным видам мелкой промышленности. Но сами

[1] F. Reuleaux. Lehrbuch der Kinematik, т. 1, 1875, § 137. Рело перечисляет (стр. 528) разные виды мелких двигателей (газовых двигателей, работающих горячим воздухом, водостолбовых, керосиновых) и говорит о них следующее: «Из этих двигателей многие работают уже дешевле, чем паровые машины, и предназначены по самому своему существу оставаться при малой мощности, т. е. не имеют тенденции к увеличению. Они могут делать, несомненно, конкуренцию паровой машине в области от 1 до 2—3 л. с. Поэтому их следует причислить к важнейшим новым машинам; в них лежат зародыши к полному преобразованию части всей промышленности».

Весь этот параграф носит название «Значение машины для общества» и содержит ряд мыслей о значении разделения труда, влияния машин на благосостояние рабочего класса и т. д., разбор которых выходит за пределы настоящего сочинения.

[2] Маркс, Энгельс, Ленин и Сталин о технике, 1934, стр. 165. Из письма Энгельса к Бернштейну, написанного в 1883 г.

[3] Eberle. Kosten der Krafterzeugung», Halle, 1898.

[4] Eberle. Цит. соч., стр. 24 и 44.

эти двигатели в скором времени вступили на путь укрупнения мощности и стали применяться в средней и крупной промышленности. Однако, первый крупный шаг в развитии двигателей внутреннего сгорания был сделан в сторону создания двигателей с мощностями еще меньшими, чем двигатели Ленуара: это были атмосферные машины Отто-Лангена.

Атмосферная машина Отто-Лангена

Период от появления машины Ленуара до 1867 г. не представляет чего-либо особенно интересного в отношении исполненных машин. В 1862 г. появился двигатель Гугона, отличавшийся от двигателя Ленуара, во-первых—способом зажигания (посредством пламени, а не электрической искры), во-вторых — впрыскиванием воды внутрь цилиндра, что уменьшало расход на смазку, чрезвычайно большой в машинах Ленуара и несколько увеличивало коэффициент полезного действия двигателя, но распространения не получило. Большое значение приобрели в дальнейшем предложения, вводящие сжатие газовой смеси в цикле операций газового двигателя; об этих предложениях мы будем говорить дальше. Крупным же шагом в отношении исполненных двигателей было появление атмосферной машины немецких изобретателей Отто и Лангена. Она сделалась известной широким кругам после появления своего на выставке 1867 г.[1] В атмосферной машине Отто и Лангена осуществлена практически идея, которая положена была в основу патента Барзанти и Маттеучи, т. е. подъем тяжелого поршня посредством взрыва горючей смеси без совершения внешней работы, причем происходит расширение газа до давления ниже атмосферного, а затем — опускание поршня под влиянием силы тяжести и атмосферного давления с совершением внешней работы.

Разрез двигателя изображен на фиг. 146.

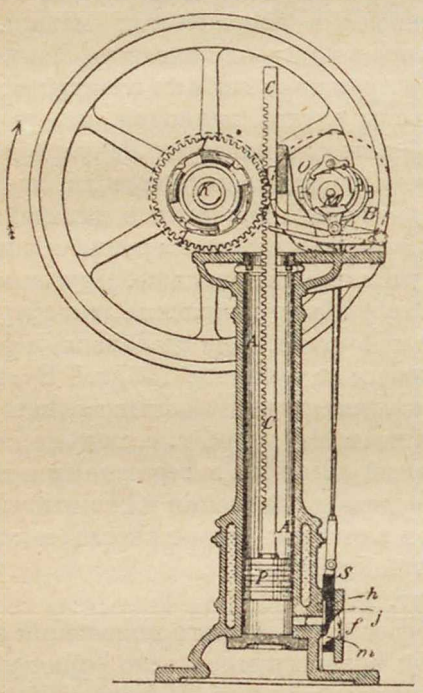
Двигатель работает следующим образом: из нижнего положения поршень подымается сначала живой силой вращающегося вала, причем золотничек *s* открывает доступ горючей смеси в цилиндр. Немедленно после окончания впуска происходит взрыв, подымающий вверх поршень. Связь его с зубчатым колесом *T* остается и колесо вращается против часовой стрелки, но связь колеса с валом прерывается благодаря особенному устройству сцепного приспособления. Давление под поршнем быстро убывает вследствие движения поршня вверх и водяного охлаждения цилиндра. Таким образом движение поршня вверх замедляется и, наконец, он останавливается. Для предупреждения вылетания поршня из цилиндра наверху поставлена резиновая упорка. При движении вниз происходит сцепление зубчатого колеса с валом и производится работа. Но при дальнейшем движении вниз происходит замедление движения и зубчатое колесо вновь расцепляется с валом; поршень продолжает свободно падать вниз,

[1] Биографические сведения об Отто и Лангене можно найти в новейших статьях, написанных по поводу столетия со дня их рождения, например, в журнале «Engineering» 22 сентября, 1933. Биография Отто, составленная проф. Слаби, помещена в журнале «Ber. des Ver. zur Beförd. des Gewerbefl.», 1896.

производя выпуск горючих газов в атмосферу. Индикаторная диаграмма атмосферной машины изображена на фиг. 147.

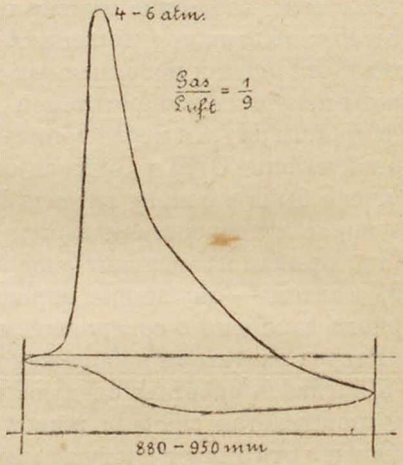
Из нее видно, что главную роль в работе играет не атмосферное давление, а вес поршня, так как большая часть работы происходит при давлении выше атмосферного. Очень остроумно исполнено сцепляющее приспособление зубчатого колеса с валом. Оно изображено на фиг. 148.

На главном валу заклинен диск *a*. На втулке этого диска свободно движутся шайбы *b*, которые прочно связаны с зубчатым венцом (образующим колесо *T* на фиг. 148) четырьмя болтами.



Фиг. 146

Внутренняя сторона венца *c* имеет 4 выступа, между которыми и диском *a* лежат клинья *e*, придавливаемые сверху роликами. При движении вверх зубчатый

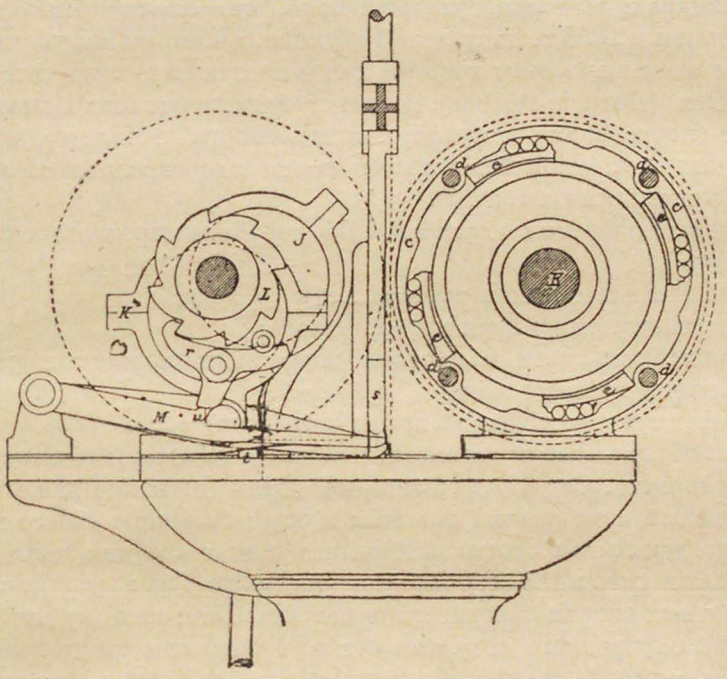


Фиг. 147

венец *c* движется по часовой стрелке ролика и клинья *e* не действуют на диск *a* и на вал, вращающиеся всегда против часовой стрелки. При движении поршня и зубчатой полосы вниз зубчатый венец *a* вращается тоже против часовой стрелки и притом со скоростью большей, чем скорость вращения колеса *a*; тогда ролики зажимаются внутренними наклонными плоскостями и происходит воздействие зубчатого венца *c* (т. е. зубчатой полосы) и поршня на вал.

При вращении в ту же сторону зубчатого венца *c* и колеса *a*, но когда скорость *c* меньше скорости *a*, опять прекращается воздействие венца *c* на колесо *a* и на вал. Зажигание производится в этом двигателе посредством пламени газового рожка. Так как рабочим давлением здесь является атмосферное и сила тяжести поршня, то этот двигатель действительно мог быть исполнен только для самых малых мощностей от ½ до 2—3 л. с.

двигатели Бишопа строились по той же системе мощности даже меньшей ½ л. с. Атмосферная машина Отто-Лангена дала очень малый расход газа: опыты Треска с выставочной машиной дали расход газа, равный 1,359 м³ на л. с. ч., т. е. в два с лишним раза меньший, чем машины Ленуара; позднейшие усовершенствования понизили этот расход до 0,834 м³ газа на л. с. ч., при теплотворной способности газа около 5000 кал. это давало бы экономический коэффициент полезного действия, равный 15,3%. Этот малый расход газа содействовал распространению машин Отто-Лангена, и в 10 лет их было построено около 5000 на заводе Отто в Дейтце (возле



Фиг. 148

Кёльна), хотя работа их сопровождалась крайне неприятным шумом, напоминающим выстрелы.

Четырехтактный двигатель Отто

В промежутке между выставками 1867 и 1878 гг. появилось несколько новых двигателей: Бишопа (Bishop) и Гилеля (Gillel), представлявшими некоторые изменения атмосферной машины; Гика в Вене, пытавшегося применить в своем двигателе керосин вместо газа; американца Брайтона (Brighton) в Филадельфии, который тоже применял в своем двигателе керосин и , кроме того, ввел постепенное сгорание, так что может рассматриваться как один из предшественников Дизеля. Но все эти двигатели не получили большого значения и были совершенно оставлены после появления четырехтактного двигателя Отто.

В двигателе Отто осуществлены были следующие четыре принципа: 1) сжатие смеси до воспламенения; 2) воспламенение смеси в мертвом положении поршня (этим избегается удар, неизбежный при воспламенении в середине хода, как в двигателе Ленуара); 3) применение четырехтактного процесса, т. е. применение цилиндра двигателя то как насоса, то как рабочего цилиндра; 4) расположение смеси так, чтобы возле места зажигания получалась наиболее богатая горючим газом смесь. Идеи эти не были новыми. Уже Барнет применял в 1838 г. сжатие; в английском патенте Миллиона (Million) в 1861 г. тоже предлагалось сжатие, хотя и в отдельных цилиндрах; наконец, утверждалось, что сжатие было применено в построенном в 1858 г. двигателе Рейтмана, о котором мы упоминали. Но особенное значение в этом вопросе имеет ходатайство о патенте француза Бо де Роша (Beau de Rochas): патент этот испрашивался 1 января 1862 г. Он носит скорее форму мемуара, чем ходатайства о патенте, что и видно из его названия: «Новейшие исследования относительно практических условий применения теплоты».[1]

Для осуществления своих идей Бо де Роша предлагает следующий процесс:

1) всасывание смеси в течение первого хода;

2) сжатие смеси во время второго хода;

3) зажигание смеси в мертвом положении поршня и расширение смеси во время третьего хода;

4) выталкивание смеси во время четвертого хода.

Это есть тот самый четырехтактный процесс, который был осуществлен в двигателе Отто. Сам Бо де Роша не довел до конца даже патентных формальностей и не сделал попытки к осуществлению своего двигателя, и даже не доказывал своего приоритета при появлении двигателя Отто (Бо де Роша умер в 1892 г.). О сочинении Бо де Роша вспомнили только при патентных спорах относительно патента Отто: поэтому все историки двигателей внутреннего сгорания считают Отто самостоятельно пришедшим к своему изобретению. Во всяком случае, заслуга осуществления идей своих предшественников всецело принадлежит Отто.[2]

Двигатель Отто 1878 г. изображен в горизонтальном разрезе на фиг. 149 и в поперечном вертикальном на фиг. 150.

Параллельно раме идет распределительный валик, делающий, благодаря конической передаче с передаточным числом 1 : 2, вдвое меньше оборотов. От этого распределительного валика сделана передача к золотнику, управляющему впуском газа, воздуха и зажиганием смеси, а также передача к выпускному клапану. Золотник отдельно изображен на фиг. 151.

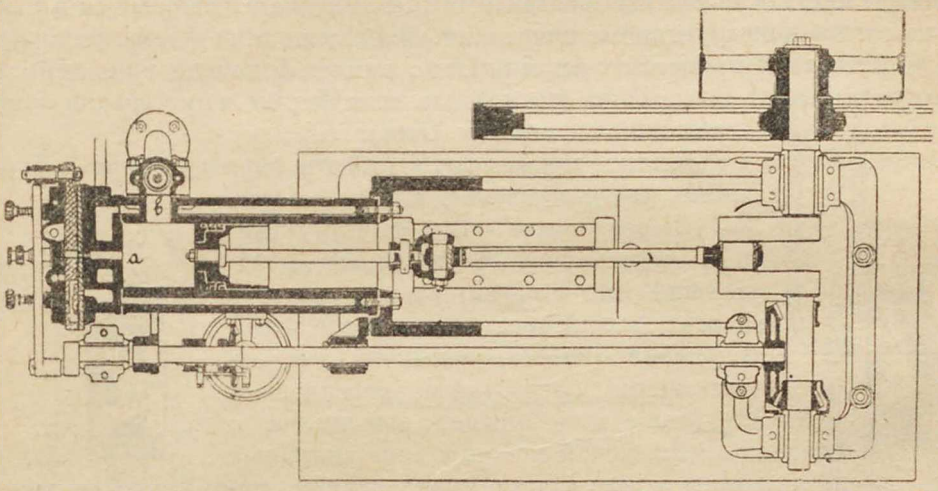
На рисунке видно, каким образом золотник приводит в соприкосновение внутренность цилиндра с воздухом (камера *c*) и газом (камера *e*).

[1] Nouvelles recherches sur les conditions pratiques d'emploi de la chaleur. Сочинение это издано было в литографированном виде в небольшом количестве экземпляров.

[2] Французское Общество поощрения национальной промышленности присудило Бо де Роша в 1887 г. одну из своих премий в награду за его труд, ставящий его в ряду главных предшественников Отто.

В том же золотнике имеется камера для зажигания, отдельно изображенная на фиг. 152 и 153.

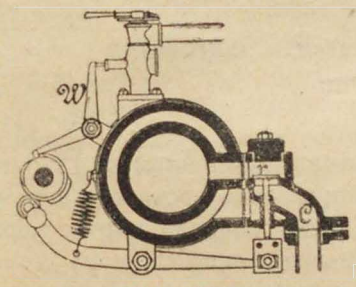
Она наполняется газом через отверстие, а воздухом — через *i*. Смесь зажигается посредством постоянно горящего газового рожка. В нужный



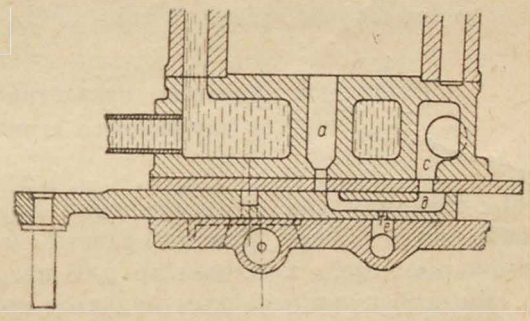
Фиг. 149

момент камера *g* с горящей смесью приводится в соприкосновение с отверстием *a*, идущим в цилиндре, вследствие чего воспламеняется смесь, имеющаяся в цилиндре.

Регулирование машины сделано так, что или впускается нормальная смесь, или газ вовсе не впускается и взрыв не происходит. Это регу-



Фиг. 150



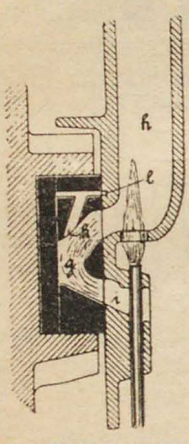
Фиг. 151

лирование характеризуется термином «регулирование посредством впуска всего или ничего» («régularisation par l'admission de tout ou rien»).

Охлаждение цилиндра сделано водяное. Двигатель Отто оказался в эксплоатации очень удобным. Расход газа в малых машинах не был меньше, чем у атмосферных машин, [1] но удобство эксплоатации и

[1] Один из опытов Брауэра дал расход газа для двигателя в 2 л/с., равный 0,978м³ л. с. ч., а для 25-сильного двигателя —0,708 м³ л. с. ч.

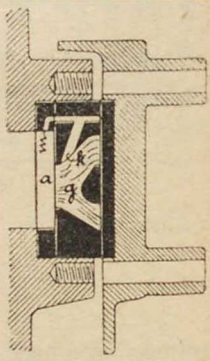
преимущества нового двигателя Отто были слишком очевидны и обеспечили ему полный успех. Завод Отто в Дейтце («Отто-Дейтц») построил за первые 20 лет, истекшие со времени появления двигателя 1878 г., до 6000 двигателей. Целый ряд других фирм в Германии, Англии и Франции занялся изготовлением четырехтактных газовых двигателей, внося в них те или иные конструктивные изменения. Многим из этих фирм пришлось вести патентные процессы с фирмой Отто, причем большую роль играли ссылки на патент Бо де Роша (хотя фактически фирмы заимствовали идею своих конструкций у Отто).



Фиг. 152

В конце концов (в 1884 г.) эти фирмы добились в Германии аннулирования патента Отто.

В результате этих конструктивных видоизменений сложился позднейший тип четырехтактного газового двигателя с распределением посредством клапанов (вместо золотника), с зажиганием посредством раскаленной трубочки в небольших двигателях и электрической искры в более крупных двигателях и с регулированием посредством изменения состава газовой смеси. Многие крупные фирмы строили этот тип с малыми отличиями: Кросслей в Англии, французская компания газовых двигателей во Франции, Кертинг, Бенц в Германии и другие. Нас интересуют более типы двигателей, принципиально отличающиеся от двигателя Отто.



Фиг. 153

Различные процессы, предлагавшиеся в двигателях внутреннего сгорания

Мы говорили уже о предложении Брайтона, сделанном в 1873 г., для работы на керосине. Для этой работы ему пришлось построить первый карбюратор, т. е. прибор для насыщения воздуха паром керосина. Но особенно интересным является применение постепенного сгорания. В двигателях Отто сгорание происходило не моментально, как показывают диаграммы двигателей старого типа.

Эта медленность сгорания вызывалась Отто отчасти намеренно и являлась следствием его взгляда о пользе неравномерного распределения газа в смеси («расположение заряда слоями и замедленное сгорание» — «schichtenweise Lagerung der Ladung und verlangsamte Verbrennung»). Эта идея высказана даже в патенте Отто, но затем она была оставлена, и позднейшие двигатели Отто дают диаграмму с почти вертикальной линией сгорания (фиг. 154).

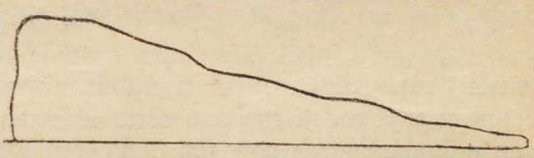
Двигатель же Брайтона является действительно двигателем с постепенным сгоранием, как показывает диаграмма на фиг. 155.

В Англии двигатели с постепенным сгоранием строились Саймоном (Simon) с 1877—1878 гг.; эта машина была представлена на Парижской выставке 1878 г. Наверху цилиндра своего двигателя Саймон помещал паровой котел и впрыскивал некоторое количество пара в рабочий цилиндр. В. Сименс, предложивший уже в 1860 г. двигатель со сгоранием при постоянном давлении, в 1881 г. предложил конструкцию тоже со сгоранием при постоянном давлении, но еще усложненную введением регенератора. [1] Осуществлен этот двигатель не был.

Фиг. 154

Делалось много предложений изменить четырехтактный процесс, например, перейти к шеститактному, в котором вводилось 2 лишних хода: в течение одного из них всасывался чистый воздух, в течение второго он выталкивался; цель этих двух лишних тактов была очистка цилиндра от остаточных продуктов сгорания. Но предложение это (исполняемое некоторыми английскими фирмами) успеха не имело и для очистки цилиндра от продуктов сгорания стали прибегать к другим средствам.

Так же мало успеха имели предложения Аткинсона — машин с двумя поршнями, движущимися в одном цилиндре; осуществляются за один оборот все четыре периода, [2] которые в четырехтактном двигателе требуют двух оборотов.


Фиг. 155

Зато большое значение получили предложения настоящих двухтактных двигателей. Двигатели этого типа предлагались около 1880 г. немецкими изобретателями Виттинг и Геес и строились фирмой Кёртинг и около того же времени в Англии Клерком (Clerk) — одним из крупнейших деятелей в области двигателей внутреннего сгорания. [3]

Двигатель Клерка изображен на фиг. 156.

---

[1] Изображение ее имеется у Донкина, цит. соч., стр. 324.

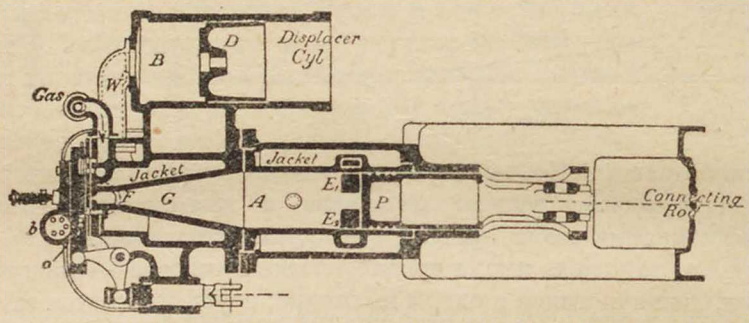
[2] В ту же эпоху предлагался в Германии двигатель Функа (Funk) с противоположно движущимися поршнями, являющийся прототипом позднейших двигателей Юнкерса и Эхельгейзера.

[3] Очерк деятельности Д. Клерка в области двигателей внутреннего сгорания помещен в журнале «Engineering» «Sir Dugald Clerk and the Gas Engine», дек. 16, 1932.

A — рабочий цилиндр, G — пространство сжатия, B — насос. В насосном цилиндре происходит всасывание горючей смеси и небольшое сжатие (до 1½—2 ата). Эта смесь вдувается в рабочий цилиндр и выталкивает из него продукты предыдущего сгорания через отверстия E, сделанные в цилиндре и затем сжимается при обратном движении поршня, после закрытия последним отверстий E. Принцип двухтактного двигателя в то время не получил особенного значения, но впоследствии нашел широкое применение в больших газовых двигателях и в двигателях Дизеля. Делались также попытки увеличить расширение продуктов сгорания в четырехтактных двигателях, для чего предлагалось продолжить его во втором цилиндре (двигатель «компоунд»), но предложения эти особенного успеха не имели.

Применение жидкого топлива и специальных газов в двигателях внутреннего сгорания

Первоначально двигатели внутреннего сгорания строились для светильного газа. Это было вызвано, в первую очередь, потребно-



Фиг. 156

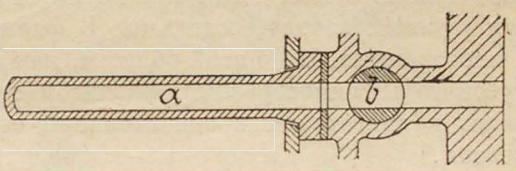
стями городской мелкой промышленности, для которой присоединение к городской газовой сети являлось очень простым и удобным, так как в большинстве городов Западной Европы и Америки имелось к тому времени газовое освещение и широко развитые сети газопроводов. Но хотя газовые компании вводили пониженный тариф для газа, употребляемого в двигателях, все же газ стоил дорого и это препятствовало применению его в двигателях крупных размеров даже в городах.

Сельское же хозяйство, не имевшее светильного газа, лишено было возможности применять двигатели внутреннего сгорания. Эта потребность вызвала стремление к устройству двигателей, работающих на жидком топливе и на газообразном, более дешевом, специально вырабатываемом для двигателей Первым жидким топливом, нашедшим широкое применение в двигателях, был бензин. Двигатели Гока (1873 г.) и Брайтона (1876 г.), о которых мы говорили выше, хотя строились для керосина, но работали фактически на бензине. Расход бензина получался в этих

двигателях большой: у Гока—0,75—1 кг бензина на 1 л. с. ч. Поэтому успеха двигатели этих фирм не имели. В середине 80-х годов начинается, однако, сильное движение в пользу создания бензиновых двигателей. Из них следует упомянуть о двигателе Шпиля (Spiel), изготовлявшемся на Дрезденском машиностроительном заводе и особенно о двигателе Даймлера.

Последний сконструировал для своих двигателей специальную зажигательную трубку открытого типа (немецкий патент № 28 022, 1883 г.), которая дала возможность строить бензиновый двигатель с большим числом оборотов и тем самым сделала возможной постройку автомобильных двигателей, которой и занялся Даймлер, считающийся вообще одним из первых создателей автомобиля (1885 г.).[1] Раскаленная трубочка применялась для зажигания заводом Дейтц, но этот завод вводил специальный распределительный кран, соединявший раскаленную трубочку с внутренностью цилиндра (фиг. 157).

Даймлеру удалось показать, что распределительный кран вовсе не нужен и что раскаленная трубочка, совершенно открытая в сторону цилиндра, производит воспламенение горючей смеси только в нужный момент (т. е. при наибольшем сжатии в мертвом положении поршня).



Фиг. 157

Сами по себе бензиновые двигатели не представляют особенных отличий от газовых двигателей, но нуждаются в специально выработанных конструкциях карбюраторов, что было сделано Даймлером и другими.

Хотя бензиновые двигатели нашли довольно широкое применение (особенно в сельском хозяйстве), однако огнеопасность бензина и его дорогая цена препятствовали их дальнейшему распространению. Поэтому заводы, строившие двигатели внутреннего сгорания, стали заниматься вопросом о применении более тяжелого и менее взрывчатого керосина (плотность около 0,8 кг/л, теплотворная способность около 10 000 кал/кг).

В разработке практически пригодных керосиновых двигателей сыграли крупную роль английские инженеры. Одним из первых керосиновых двигателей был двигатель Пристмана (Priestman), появившийся в 1888 г., а затем керосиновые двигатели начали строиться в большом количестве многими фирмами в Англии, Германии, Америке, Франции и других странах. Их строили все фирмы, строившие газовые двигатели: так, в Германии они строились заводом Отто-Дейтц, Кёртинг, Бенц, Дрезденской фабрикой моторов и др. В Англии они строились заводом Кросслей, Рустон и др., в Америке—большим числом фирм,[2] во Франции—Ленуар, Симплекс, Ньель и др., в Швейцарии заводом в Винтертуре (Schweizerische

[1] Kraemer und Hussler. «G. Daimler». Z. d. VDI, № 10, 1934 г.

[2] См. перечень их у Донкина, цит. соч., гл. XXI.

Maschinen Fabrik). В России (где для газовых двигателей условия были не благоприятны вследствие малого распространения газовых заводов) в 80-х годах делались попытки строить газовые двигатели, но они не получили развития. Но производством керосиновых двигателей занялось несколько заводов: завод Л. Нобеля в Петербурге, Бромлея — в Москве, Липгарта — в Москве, Мальцевского товарищества и некоторые другие. На выставке 1896 г. в Нижнем-Новгороде были представлены двигатели 7 русских заводов.[1] В 1895 г. организована была Московским обществом сельского хозяйства выставка машин на Бутырском хуторе. На выставке этой представлены были керосиновые двигатели 5 русских заводов: [2] Бромлея — в Москве (вертикальный сдвоенный двигатель на 7 л. с.), Эмиля Липгарта в Москве (вертикальные двигатели в 4 и 12 л. с. и керосиновый локомобиль в 6 л. с.), Густава Листа в Москве (½ л. с.), Рихарда Поле в Риге (вертикальные двигатели в 3 и 6 л. с.), Л. Нобеля в Петербурге (горизонтальный двигатель в 8 л. с.). Как видно из приведенного перечня, двигатели эти довольно разнообразны. По качеству русские двигатели не были плохи: в рассматриваемой экспертизе первые 5 мест были заняты иностранными заводами, но затем шли три русских завода, остальные 6 фирм шли в перемежку — русские и иностранные. Но в этой области, как и в большинстве других областей русского машиностроения, развитой специализации не было, и потребность в двигателях в значительной степени покрывалась иностранным ввозом.[3]

Возвращаясь к керосиновым двигателям вообще, надо заметить, что они работали в большинстве случаев так же, как и газовые, — по циклу Отто, и отличались друг от друга конструктивными деталями и особенно — карбюраторами. Отдельно следует поставить двигатель Горнсби-Акройд, созданный около 1892 г.: в нем нет отдельного карбюратора, здесь производится сжатие чистого воздуха. В мертвом положении производится насосом впрыскивание жидкого керосина; этот керосин впрыскивается в головку цилиндра, которая первоначально накаливается снаружи лампой. Во время работы двигателя лампа тушится и высокая температура головки поддерживается взрывами. Двигатель Горнсби изображен на фиг. 158.

Сжатие чистого воздуха и впрыскивание горючего только в мертвом положении поршня (или с очень небольшим опережением) в двигателе Горнсби является прототипом позднейшего способа работы в двигателе Дизеля. С другой стороны, двигатель Горнсби-Акройд схож по способу работы с т. н. нефтянками, работающими тоже без специального зажигания, с калильной головкой (или калильным шаром). Эти двигатели, строившиеся обыкновенно для мелких и средних мощностей, получили чрезвычайное развитие уже в девятисотые годы. Двигатели эти строились,

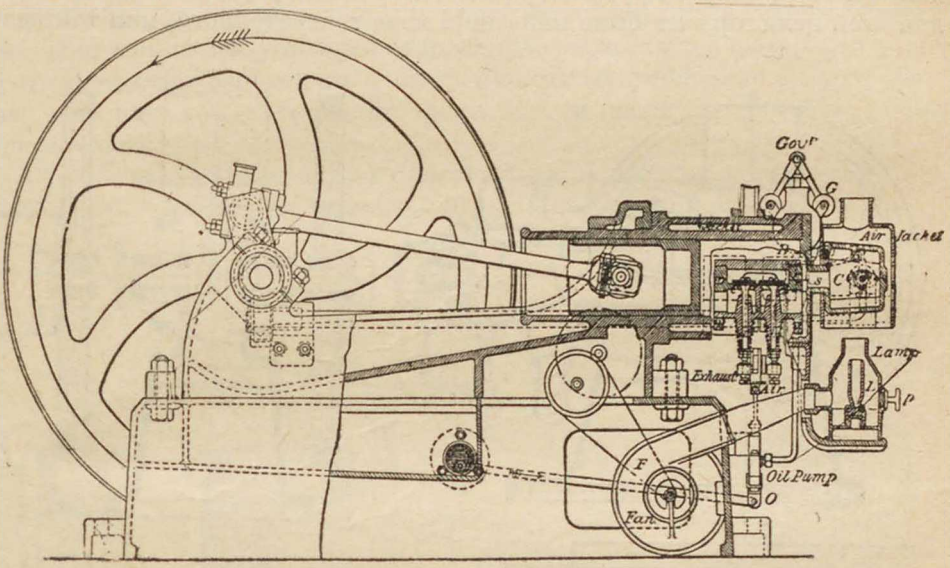
---

[1] Д. С. Зернов. Статья в сборнике «Успехи русской промышленности по обзорам экспертных комиссий».

[2] Д. С. Зернов. Экспертиза керосиновых двигателей. Москва, 1896 г.

[3] В. И. Гриневецкий. Цит. статья. Вестн. общ. технологов, 1915 г.

однако, обыкновенно не четырехтактными, а двухтактными, что сильно упрощало их конструкцию. Их много строили шведские фирмы, например Боллиндер, Аванс и др. К постройке их (около 1910 г.) перешли и многие русские заводы: двигатели Русь, Урсус (в Варшаве), Экваль в Петербурге. Двигатели эти были представлены в большом количестве на выставке 1910 г. в Петербурге. [1] Один из типов таких двигателей изображен на фиг. 159. Расход керосина в старых 4-тактных двигателях много раз определялся. Так, в опытах Унвина (Unwin) с машиной Пристмана в 1891 г.



Фиг. 158

получился расход керосина, равный 0,38 кг/эфф. л. с. ч., что соответствует

$$\frac{632{,}3}{11950 \cdot 038} = 0{,}14.$$

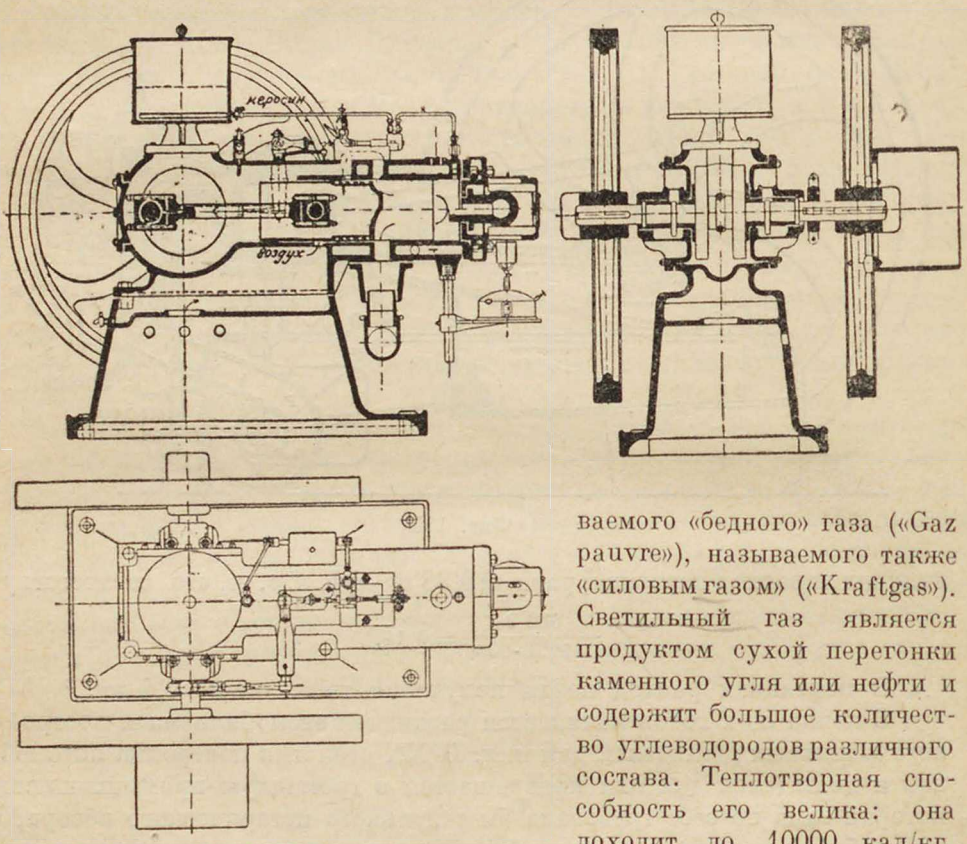
В нефтянках расход нефти получался тоже около 0,4 кг. [2]

С конца 80-х годов начинается развитие автомобилизма и постройка автомобильных двигателей для них. В XX столетии постройка автомобилей и двигателей для них превращается в громадную промышленность, которая сама по себе требовала бы отдельного исторического обзора, но мы не будем ее касаться так же, как развития двигателей для тракторов и авиационных.

[1] Испытание двигателей внутреннего сгорания. Труды экспертной комиссии Международной выставки двигателей внутреннего сгорания. Петербург, 1911.

[2] Неоднократно также делались попытки применения спирта в двигателях вместо керосина и бензина. Вопрос этот имел большое значение для сельскохозяйственных двигателей, которые могли бы пользоваться спиртом, получаемым на небольших заводах для получения спирта сельскохозяйственного типа. Особенного распространения применение спирта в двигателях не получило. См. статью Д. Н. Дьякова «Применение спирта в двигателях внутреннего сгорания». Зап. Русск. техн. общ., 1915.

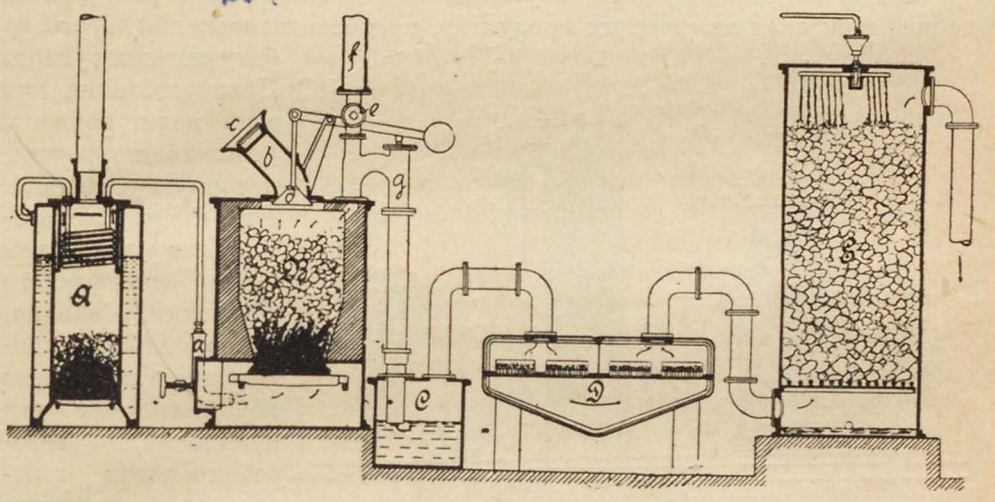
Керосиновые двигатели получили особенное значение в сельском хозяйстве в виде мелких двигателей; они применялись также для небольших электрических станций, для приведения в движение небольших мастерских и т. п. случаях. Но и керосиновые двигатели (как и двигатели светильного газа) были неподходящими для больших мощностей вследствие дороговизны керосина. Поэтому крупная промышленность, искавшая способов воспользоваться выгодами двигателей внутреннего сгорания, должна была искать других горючих для их обслуживания. Подходящее для этой цели горючее было найдено в виде генераторного, или так называемого «бедного» газа («Gaz pauvre»), называемого также «силовым газом» («Kraftgas»). Светильный газ является продуктом сухой перегонки каменного угля или нефти и содержит большое количество углеводородов различного состава. Теплотворная способность его велика: она доходит до 10000 кал/кг, т. е. при плотности светильного газа около 0,5 до 5000 кал/м³. Между тем, в металлургии давно уже применялся газ Сименса, представлявший собою смесь окиси углерода с азотом воздуха; газ этот имеет малую теплотворную способность; он получается при неполном сгорании каменного угля. С другой стороны в газовой промышленности известен был «водяной газ», являющийся смесью окиси углерода и водорода: он получается при пропускании водяного пара через раскаленный уголь.



Фиг. 159

Довсон (Dowson) был один из первых, который соединил обе указанные реакции в одну и получил силовой газ пропусканием смеси воздуха и водяного пара через слой раскаленного топлива, причем получается газ, состоящий из окиси углерода, водорода и большого количества азота. Как топливо при добывании газа Довсона применялся обыкновенно кокс или антрацит (позже стал применяться тощий каменный уголь, а затем и другое топливо); газ содержал, кроме вышеуказанных главных составных частей, примеси углеводородов, получающихся в генераторе, как продукт сухой перегонки топлива; от этих примесей необходимо было очищать газ, так как они загрязняли двигатель и даже делали его работу невозможной.

Теплотворная способность газа Довсона, получаемого из антрацита — 1200—1300 кал/м³; из кокса — 1000—1100 кал./м³, плотность около



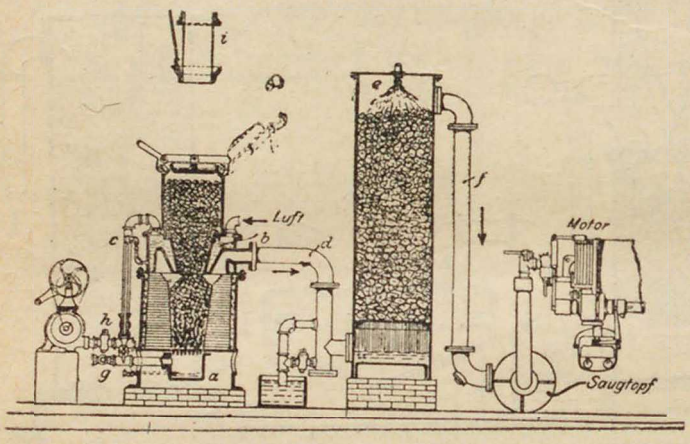
Фиг. 160

1,2 кг/м³. Для получения своего газа Довсон предложил специальное газогенераторное устройство, состоящее из небольшого парового котла с перегревателем, самого генератора, очистителя и газгольдера. Первый патент Довсона был взят 10 октября 1878 г., но практически они стали применяться после взятия Довсоном второго патента (10 июля 1883 г.). Затем газовые генераторы стали строиться и другими фирмами. На фиг. 160 изображена газогенераторная установка завода Отто-Дейтц. Пар получается в котле и проходит в пароперегреватель, а оттуда — через эжектор под решетку генератора; эжектор этот всасывает нужный воздух. Смесь проходит через слой кокса или антрацита и образует генераторный газ, который проходит через водяной очиститель и очиститель с древесными опилками, а затем проходит через скруббер, в котором промывается водой, идущей сверху на крупные куски кокса, между которыми проходит газ. После скруббера газ попадает в газгольдер (не показанный на рисунке).

и оттуда в двигатель. Вся эта система находится под давлением бо́льшим атмосферного.

Введение специального газового генератора в корне изменяет установку с газовым двигателем, которая, при применении светильного газа или жидкого топлива, характеризуется именно отсутствием всякого аппарата для предварительного получения рабочего тела (карбюраторы или испарители жидкого топлива непосредственно соединены с двигателем). В особенности присутствие парового котла (хотя и небольшого) отнимало значительную часть удобств, представляемых прежними газовыми двигателями. Установки получались более пригодные для больших мощностей; иногда эти установки достигали даже значительных мощностей; так, например, в Базеле проф. Евгений Мейер исследовал установку водопровода мощностью в 127,5 эфф. л. с.

В Англии Манд предложил устраивать газовые генераторы с утилизацией побочных химических продуктов, предназначенные для работы на битуминозных углях. Приспособления для этой цели, конечно, усложняют газогенераторную установку. Все газовые генераторы с давлением выше атмосферного встретили, однако, скоро сильную конкуренцию со стороны новой системы так называемых газовсасывающих генераторов, давление которых меньше атмосферного. Такие генераторы работают без котла, а смесь засасывается всасывающим действием двигателя. Идея такого генератора была высказана очень рано: она содержится во французском патенте испанского профессора Арбоса — J. Arbos (патент № 563740 от 14 ноября 1862 г.). Но эта эпоха представляла мало данных для осуществления подобной идеи (и самый двигатель, предложенный Арбосом, не был достаточно разработан); эта идея возродилась только после создания генераторов с избыточным давлением. Одним из инициаторов создания газовсасывающих генераторов был французский инженер Бенье (Benier), а затем они начали строиться тоже всеми фирмами, изготовляющими двигатели. Эти устройства гораздо проще, чем газогенераторные установки с давлением; поэтому они стали сильно распространяться и вытеснили генераторные установки с давлением, по крайней мере, из области малых и средних мощностей. Разрез всасывающего генератора фирмы Отто-Дейтц изображен на фиг. 161.



Фиг. 161

Сверху имеется отверстие для насыпания топлива, закрываемое крышкой, — топка, наполняемая раскаленным коксом или антрацитом. Вода помещается в верхней части генерато а *b* и под действием теплоты продуктов сгорания дает пары. Воздух засасывается через открытую трубку (надпись — Luft), насыщается водяными парами и проходит по трубе *c* под колосники и затем проходит через слой топлива, давая рабочий газ, который по трубе *b* идет в скруббер и двигатель. Ручной вентилятор служит для разжигания генератора. Газогенераторные двигатели с газовсасывающими генераторами получили большое распространение в 90-ые годы и строились даже больших мощностей. Зажигание в них пришлось ввести электрическое, так как генераторный газ не давал пламени, необходимого для раскаления зажигательной трубочки; в них введен был также ряд других усовершенствований: улучшено регулирование, введены специальные приспособления для пуска в ход и т. д.

В газогенераторах делались также крупные усовершенствования. Особенно интересными были попытки построить генератор для низкосортного топлива: дерева, отбросов разных производств и т. п. Такой генератор был построен Рише (Riché) во Франции и получил известное распространение (в России он строился на Коломенском заводе).

Применение генераторного газа позволило увеличить сжатие (до 12—15 ата, вместо 4—5 при светильном газе) и повысить использование тепла в газовых двигателях. В связи с увеличением мощности (доходившей уже до нескольких сот лошадиных сил), использование тепла в газовых двигателях повысилось до 20—24%. Так, в опыте, произведенном Витцем (Witz) и Мато (Mathot) в 1904 г. над 200-сильным двигателем двойного действия Отто-Дейтц, получился расход антрацита, равный 0,324 кг/эфф. л. с. ч. Если принять теплотворную способность антрацита равной 8000 кал/кг, то получится

$$\eta_{эк.} = \frac{632{,}3}{8000 \cdot 0{,}324} = 0{,}244.$$

Применение генераторного газа в газовых двигателях дало заводам большой опыт в деле постройки крупных двигателей, а также в вопросе очистки газов и применения газов с малой теплотворной способностью. Этот опыт дал возможность поставить задачу об утилизации газов, являющихся побочными продуктами металлургических процессов, в первую очередь — газов доменных печей. При раскислении железных руд в доменных печах, наверху последних выделяется газ, состоящий, главным образом, из окиси углерода и азота, способный к горению. Таким образом, состав его довольно близок к составу генераторного газа, но газ доменных печей выходит сильно загрязненным пылью и смолистыми примесями; кроме того, состав доменных газов очень изменчив, давление его тоже меняется; наконец, он имеет слишком высокую температуру. Он применялся раньше на некоторых заводах для сжигания под паровыми котлами, но и это применение его тоже было связано с разными практическими неудобствами. Но, с другой стороны, задача утилизации газов доменных печей (а позже и коксовальных печей) является крайне важной для промышленности

в виду возможности получения больших мощностей при крупных размерах добычи чугуна, [1] а следовательно, и большого количества отходящих газов, могущих быть утилизированными.

Поэтому в конце 90-х годов (около 1895—1896 гг.) почти одновременно в Англии, Германии и Бельгии начались опыты с применением газов доменных печей в двигателях. Опыты эти сначала производились на небольших двигателях. Но небольшие двигатели не имели значения для металлургических заводов и пришлось быстро перейти к постройке и испытанию крупных двигателей по несколько сот сил в каждом. В Англии опыты с двигателями, работающими газом доменных печей, производил Твайт (Twite), во Франции и Бельгии — Витц, в Германии — Витц и Евгений Мейер. Эти опыты повели к благоприятным результатам, после чего начали быстро строиться весьма крупные двигатели: завод Коккериля в Серенге (Бельгия) построил одноцилиндровый двигатель в 600 л. с., который фигурировал на Парижской выставке 1900 г. и возбуждал там общее внимание, наглядно опровергая мнение Рело, приведенное нами выше о том, что газовые двигатели не имеют тенденции к укрупнению. Затем развитие двигателей, работающих газами доменных печей (а также и коксовых печей), пошло быстрыми шагами, и этим занялся целый ряд заводов. [2]

Двигатели стали строиться двойного действия, двухцилиндровые (тендем); мощность их повысилась до 1500—2000 л. с. и более. Коккериль, Отто-Дейтц, Аугсбург-Нюренберг строили четырехтактные двигатели, завод Кёртинга строил двухтактные двигатели по системе Эхельгейзера. Мощность крупных двигателей, построенных до 1906 г. для Германии, распределяется следующим образом. [3]

А. Двухтактные двигатели

Двигатели для приведения в движение воздуходувок	. . 51;	мощн.	—57 900 л. с.
» » » » » динамомашин	. . 41;	»	—35 700 » »
» » » » » прокатных станов	31;	»	— 5 200 » »
Всего	95;	мощн.	—98 800 л. с.

Б. Двигатели четырехтактные

1)	Двигатели для приведения в действие воздуходувок	. 84;	мощн.	—112 400 л. с.
2)	» » » » » динамомашин	. 127;	»	—163 750 » »
3)	» » » » » прокатных станов	7;	»	— 10 900 » »
	Всего . . .	218;	мощн.	—287 050 л. с.

Сведения о производстве крупных газовых двигателей на заводе Коккериля перед самой войной даны в статье проф. В. С. Наумова. [4]

[1] См. вычисления Lürmann в «Stahl und Eisen», 23 апреля 1899.

[2] История этого развития изложена довольно подробно у Витца в книге: «Dernière évolution du moteur à gas», Paris, 1910.

[3] Hubert. Rev. univ. des mines, 4-me sér., т. XVI, 1906.

[4] В. С. Наумов. Производство больших газовых двигателей на заводе Коккериля. Вестн. общ. технологов, 1914.

Сведения эти дополняются в статье Гюбера, [1] который сообщает интересные данные о постройке на том же заводе двигателя в 8000 л. с., который не был закончен до войны, увезен в Германию, там достроен и возвращен обратно только после Версальского мира. Двигатель этот замечателен также своей экономичностью: расход тепла в нем получился в 2150 кал./эфф. л. с. ч., что соответствует экономическому коэффициенту 29,5%; также замечателен и механический коэффицент полезного действия этого двигателя, равный 89%.

Крупные газовые двигатели, работающие газом металлургических процессов, представляют собой высшее достижение в этой области. Они сохранили свое значение и после войны. Мы рассматривали в настоящей главе в общих чертах развитие газовых двигателей от начала их создания до эпохи войны. За эти 50 лет с небольшим они прошли тот же путь, который прошли паровые машины за все время своего существования, т. е. они стали обслуживать, главным образом, крупную промышленность и чрезвычайно усовершенствовались технически, использовав все достижения современной техники и науки.

Нам остается только сказать о развитии теории газовых двигателей в эту эпоху.

Развитие теории газовых двигателей

Построение основной теории газовых двигателей шло более быстрым темпом, чем развитие теории паровых машин, так как для построения этой теории можно было воспользоваться вполне развитой термодинамикой, а также методами, выработанными при построении теории паровых машин. Сейчас же после появления машины Ленуара строится ее приближенная теория Грасгофом (Grashof) [2] и Г. Шмидтом.[3] Несколько позже этой же теорией занимается Ренкин. [4]

Появление двигателя Отто усиливает внимание к теории газовых двигателей: появляются развитые и систематизированные изложения их термодинамической теории: Витца,[5] Шёттлера [6] и др. В третьем издании своей «Термодинамики» 1887 г. Цейнер уже включает теорию двигателей внутреннего сгорания, [7] в 1890 г. — то же делает Грасгоф [8] и затем эта

---

[1] Hubert, Rev. univ. des mines, март 1921.

[2] Grashof, Z. d. VDI, стр. 130, 1861.

[3] G. Schmidt, Z. d. VDI, стр. 217, 1861.

[4] W. Rankine. Theory of explosive engines. Engineering, стр. 24, 141, 393, 1866.

[5] A. Witz. Étude sur les moteurs à gas tonnant. Annales de Physique, 5-me sér., XXX, 1883.

A. Witz. Traité théorique et pratique des moteurs à gaz. 1-е изд., Paris, 1886.

[6] R. Schöttler. Die Gasmaschine. 1-е изд., Braunschweig, 1882.

[7] G. Zeuner. Technische Thermodynamik. Bd I, Leipzig, 1887, §§ 74—84.

[8] Grashof. Theoretische Maschinenlehre, т. III, Hamburg und Leipzig, 1890, §§ 140—144.

теория составляет непременную часть всякого курса технической термодинамики; появляется также ряд специальных сочинений, посвященных газовым двигателям и заключающих изложение их теории.

Однако, опыт паровых машин показал недостаточность чисто теоретического разбора процессов, происходящих в тепловых двигателях. В газовых двигателях с самого начала их появления большое внимание уделяется их опытному исследованию: мы упоминали уже об опытных исследованиях Треска, Мейдингера и др. над первыми двигателями. Они продолжаются рядом позднейших исследователей: Клерком, Витцем, Шёттлером, Брауэром, Унвином, Гиршем, Кеннеди, Евгением Мейером и др. На ряду с этими исследованиями практического характера производятся экспериментальные работы, имеющие целью выяснить более сложные вопросы, касающиеся газовых двигателей: обмен тепла со стенками цилиндра (Витц), калориметрическое исследование газовых двигателей — Слаби (Slaby); [1] работы, выясняющие характер сгорания в газовых двигателях: Бромвелль и Имре, [2] Брауэра, Шёттлера, Витца, Шрётера, Слаби, Клерка и др. Эти экспериментальные исследования делаются так многочисленны, что их перечисление может быть сделано только в специальных сочинениях. [3]

Мы упомянем только еще о нескольких отдельных моментах в развитии этой теории. В теоретических расчетах, касающихся газовых двигателей, большую роль играет вопрос о теплоемкостях: в ранней теории газовых двигателей они считались, как и вообще в тогдашней физике, не зависящими от температуры. Но в 1883 г. были произведены опыты над сжиганием газовых смесей Малларом и Лешателье (Mallard et Lechatelier) в связи с вопросом о взрывах рудничного газа. [4] Опыты привели этих исследователей к заключению о зависимости теплоемкостей газов от температуры. Они сначала вызывали крайнее недоверие со стороны теоретиков, но позднейшие опыты вполне подтвердили эти заключения и в настоящее время они являются общепризнанными и кладутся в основу расчета процессов горения вообще и теории газовых двигателей в частности. Этот факт является одним из многочисленных примеров, подтверждающих мысль Энгельса о чрезвычайно существенном влиянии практики на науку. [5]

Затем интересным моментом в развитии теории газовых двигателей является появление книги Гюльднера (H. Güldner «Verbrennungsmotoren», 1-е изд. в 1902 г. , 3-е — в 1914 г.) с ее девизом: «меньше изобретать — больше конструировать». («Weniger erfinden, mehr konstruiren»). Девиз

---

[1] S l a b y. Kalorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozess der Gasmaschine. Verh. des Ver. z. Beförd des Gewerbefl., 1890—1894.

[2] Z. d. VDI, стр. 271, 380, 1887.

[3] Довольно полный обзор литературы по газовым двигателям имеется в книге Schättler «Die Gasmaschine», стр. 328, 1899.

[4] Mallard et Lechatelier. Annales des Mines, IV, стр. 510, 1883.

[5] «До сих пор хвастались лишь тем, что производство обязано науке, но наука бесконечно большим обязана производству». См. Э н г е л ь с «Диалектика природы», XIV, стр. 438—439.

этот объясняется условиями немецкого производства двигателей внутреннего сгорания того времени, когда ряд крупнейших изобретений нуждался в конструктивном осуществлении, на которое часто не обращалось внимания из-за стремления выделиться во что бы то ни стало новизной идеи, а не совершенством исполнения и надежностью работы двигателей.

Упомянем в заключение о русских работах по газовым двигателям. В раннем периоде можно отметить только опытные исследования двигателей К. А. Владимирова [1] и Д. С. Зернова; [2] в более позднем периоде следует отметить совершенно оригинальный метод «теплового расчета двигателей внутреннего сгорания», созданный проф. В. И. Гриневецким. [3] Этот способ создал в России целую школу и в настоящее время является общепринятым во всех русских сочинениях по двигателям внутреннего сгорания.

---

[1] K. Wladimirow. «Über Benzin und Erdölmotoren». Rigaer Industriezeitung, 1893.

[2] Д. С. Зернов. Экспертиза керосинового двигателя. Москва, 1896.

[3] Русский перевод книги Гюльднера — Гюго Гюльднер. «Двигатели внутреннего сгорания», перевод под ред. проф. В. И. Гриневецкого, Москва, 1907 г. Дополнение редактора (проф. В. И. Гриневецкого) «Тепловой расчет двигателей».

Глава V

СОЗДАНИЕ И ДОВОЕННОЕ РАЗВИТИЕ ДИЗЕЛЬМОТОРА

Предшественники Дизеля

Относительно дизельмотора приходится повторить то же, что говорилось относительно других крупных изобретений в области теплотехники: осуществлению его предшествовал ряд высказываний основной идеи, а затем и некоторые попытки осуществления более или менее несовершенных конструкций. Но окончательное осуществление (так же, как и для большинства других изобретений) связано с одним определенным изобретателем, немецким инженером Рудольфом Дизелем, которому действительно удалось создать тепловой двигатель, отличающийся большой экономичностью, получивший чрезвычайное распространение и являющийся одним из крупнейших достижений теплотехники вообще. Заслуги самого Дизеля часто сильно оспаривались; в нападках на него были и элементы чисто личной неприязни и недоброжелательство конкурентов, но иногда и искреннее желание выяснить историю вопроса. Таким образом, по истории создания дизельмотора накопился обширный материал, но, к удивлению, в иностранной литературе нет сводного большого труда, который давал бы полную и объективную историю вопроса; нет даже хорошей биографии Дизеля. В этом отношении русская литература имеет большое преимущество, так как в ней имеется чрезвычайно полно и добросовестно составленная биография Дизеля, в связи с характеристикой и историей его изобретения, написанная Л. Гумилевским. [1]

Основными источниками по ранней истории дизельмотора являются прежде всего сочинения самого Дизеля. [2]

Большое значение также имеют сочинения противников Дизеля[3] (при всей пристрастности, а иногда и недобросовестности их авторов).

---

[1] Л. Гумилевский. Рудольф Дизель. Москва, 1935.

[2] R. Diesel. Theorie und Konstruktion eines rationallen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekanten Wärmemotoren. Berlin, 1893.

R. Diesel. Die Entstehung des Dieselmotors. Berlin, 1913.

R. Diesel und M. Schröter. Diesels rationeller Wärmemotor. Berlin, 1897. (отд. оттиск из Z. d. VDI, стр. 785, 817, 1897).

[3] A. Riedler. Dieselmotoren. Wien, 1914.

I. Lüders. Der Dieselmythus. Berlin, 1913 (сочинение, наполненное личными нападками на Дизеля).

P. Meuer. Beiträge zur Geschichte des Dieselmotors. Berlin, 1913 г.— наиболее объективно написанное из этих сочинений, заключающее большое количество личных воспоминаний автора, принимавшего участие в работах над созданием первого дизельмотора.

Из русских источников по истории развития двигателя в более позднем периоде можно указать на очень обстоятельные статьи проф. Косицкого: «Двигатель Дизеля и его развитие». Изв. Киевск. общ. по надз. за паров. котл., № 4, 6, 7, 9, 1913 г.

Ранний период истории двигателя Дизеля характеризован в статье К. Я. Мостовича: «Двигатель Дизеля». Исторический очерк. Вест. инж., № 5, 1916.

Основная идея дизельмотора — постепенное сгорание топлива — была высказана еще С. Карно. Говоря о двигателе, предложенном Ньепсами и работавшем взрывами порошка-ликоподия, он говорит:[1] «нам казалось бы более выгодным действовать не как Ньепсы, а сперва сжать воздух насосом, затем пропустить его через вполне замкнутую топку, вводя туда маленькими порциями топливо при помощи приспособления, легко осуществимого — затем заставить воздух выполнить работу в цилиндре с поршнем или в любом другом расширяющемся сосуде и, наконец, выбросить его в атмосферу или заставить пойти к паровому котлу для использования оставшейся температуры».

Но, как мы видели (гл. IV), первоначальное развитие двигателей внутреннего сгорания пошло по совершенно другому пути: как у Ленуара, так и у Отто применялось быстрое сгорание, имевшее характер взрыва («моментальное» сгорание).

В работах самого Дизеля эти указания Карно на специальный тип двигателя внутреннего сгорания, повидимому, значения не имели: его основные идеи связаны ближе, как мы увидим, с общими воззрениями Карно на наивыгоднейший цикл тепловых двигателей, с так называемым циклом Карно.

Из теоретических работ по двигателям внутреннего сгорания ближе всего подошел к идеям, позже высказанным Дизелем, немецкий ученый Келер (Koehler), издавший в 1887 г. книгу «Теория газовых двигателей». [2]

Мы говорили уже о «цикле Джоуля», предлагавшемся, правда, не для двигателей внутреннего сгорания, а для двигателей, работающих нагретым воздухом, но заключающим период сообщения тепла при постоянном давлении. Мы говорили также о предложении Сименса и особенно Брайтона и Симона двигателей со сгоранием при постоянном давлении; последние двигатели были осуществлены практически. Все эти попытки, однако, скорее можно сравнить с осуществленным фактическим двигателем Дизеля, чем с его первоначальной идеей изотермического сгорания.

---

[1] С. Карно. Размышления о движущей силе огня. Сборник «Второй закон термодинамики», стр. 59.

[2] Köhler. Theorie der Gasmotoren. Leipzig, 1887. (Напечатано сначала в журнале «Prakt. Maschinenkonstr.», 1886).

Из других предшественников Дизеля можно назвать Гаргривса, Зённекена и особенно Акройда и Капитена.

В двигателе Акройда, осуществленном Горнсби, имеется сжатие чистого воздуха и впрыскивание горючего в мертвой точке, но фактически он работает со взрывами, а не постепенным сгоранием. Что касается двигателя Капитена (Capitaine), то его двигатель отличался меньшим сжатием (16 ата), а потому необходимостью иметь особое зажигание (раскаленный испаритель,как в двигателе Горнсби — Акройд). Таким образом, он сильно отличается от двигателя Дизеля; сходство можно отметить скорее с позднейшим двигателем Дизеля в применении сжатого воздуха для распыливания керосина.

Создание первого двигателя Дизеля

Сведения о ранней жизни Рудольфа Дизеля довольно скудны. [1] Он родился в 1858 г. в Париже, от немецких родителей. Отец его был переплетчиком и имел небольшую мастерскую кожаных изделий. В связи с войной 1870 г. между Францией и Германией семье Дизеля пришлось переехать в Англию, откуда молодой Рудольф Дизель был отправлен в Аугсбург к родственникам. В Аугсбурге Дизель поступил в реальное училище, которое окончил в 1873 г. По окончании реального училища он был принят в среднюю техническую школу в Аугсбурге же, где он обратил на себя внимание выдающимися способностями и успехами. В виду этого ему предложена была стипендия для поступления в Мюнхенскую высшую политехническую школу. Эта школа являлась одной из лучших в Германии по постановке преподавания. Особенное влияние на Дизеля оказали два выдающихся теплотехника, профессора Линде (C. Linde) и Шретер (M. Schroeter), с которыми Дизель поддерживал сношения в течение всей своей дальнейшей жизни. Из лекций Линде Дизель узнал о низком использовании тепла в паровых машинах, и сильное впечатление, произведенное этими словами Линде, было одним из поводов к занятию впоследствии созданием усовершенствованного двигателя.

В 1878 г. Дизель окончил прохождение курса в Мюнхене и поступил в качестве практиканта на завод Зульцера в Винтертуре. В конце этого же года он выдержал выпускные экзамены в Мюнхене и по инициативе Линде в 1879 г. был назначен директором холодильного завода в Париже и представителем фирмы Линде по холодильным машинам во Франции, Бельгии и колониях. Занятия холодильными машинами по системе Линде, применявшими аммиак, навели Дизеля на мысль заняться созданием двигателя, который работал бы парами аммиака; эта мысль долго занимала его, но занятия его этим изобретением не привели Дизеля к особенным практическим результатам. Однако, занятия этим изобретением вновь вернули мысль Дизеля к тепловым двигателям и, естественно, что

[1] Лучшая биография Дизеля дана в вышецитированной книге Л. Гумилевского. Кроме нее можно назвать только статью Геннига (H e n n i g) «Рудольф Дизель», переведенную в сборнике «Успехи современного дизелестроения». Ленинград, 1924.

он обратился вскоре к идее усовершенствования двигателей внутреннего сгорания, являющейся в 80-ые годы одной из наиболее актуальных задач техники. Занятия этим вопросом поглотили все внимание Дизеля и ко времени своего возвращения в Германию в 1889 г.[1] он значительно подвинулся уже в разработке своей идеи.

Мы говорили уже, что эта эпоха (вторая половина 80-х годов прошлого столетия) была особенно благоприятна для занятия вопросом об усовершенствовании двигателей внутреннего сгорания: недостатки паровой машины как теплового двигателя были вполне выяснены; ее малая пригодность для применения в мелкой промышленности (кроме специальных областей, которые могли быть обслужены локомобилями) тоже чувствовалась всеми. Первоначальный газовый двигатель Отто, хотя и открывал большие перспективы, но нуждался в крупных усовершенствованиях конструктивного характера; кроме того, применение светильного газа было слишком дорого и не везде возможно, а применение газовых генераторов и жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания, как мы видели, только начиналось. Этими причинами объясняется, как появление работ ближайших предшественников Дизеля, о которых мы говорили в предыдущем отделе, так и усиленный интерес самого Дизеля к разработке вопроса о создании двигателя внутреннего сгорания нового типа.

Основной идеей Дизеля являлось приближение к циклу Карно. Для этой цели он проектировал повышение конечного давления сжатия до 33—35 атмосфер, которое сопровождалось бы повышением температуры засосанного воздуха до 500—700°; засасывать предполагалось чистый воздух, так как при засасывании горючей смеси это повышение температуры было недопустимо из-за опасности преждевременной вспышки.

В воздух, доведенный до этой высокой температуры, Дизель предполагал вводить распыленное топливо (первоначальная идея — угольный порошок). Введение этого топлива предполагалось настолько медленным, чтобы температура смеси при сгорании его не повышалась заметно («изотермическое сгорание»). В виду этого предположения об изотермичности сгорания Дизель считал ненужным водяное охлаждение цилиндра. Свои идеи об устройстве проектируемого двигателя Дизель изложил прежде всего в немецком патенте № 67207 от 28 февраля 1892 г., а затем в небольшом сочинении под названием: «Теория и конструкция рационального теплового двигателя», вышедшем в 1893 г. [2]

В формулировке патентных требований первого патента Дизеля привилегия заявляется на:

1) Способ работы для двигателей внутреннего сгорания такого рода, что в цилиндре при помощи поршня сжимается чистый воздух или смесь чистого воздуха с другим индифферентным газом так, что достигаемая

[1] Он был приглашен тем же Линде в Берлин для работы там по холодильным машинам системы Линде.

[2] Rationeller Wärmemotor, Berlin, 1843 г. (полное название книги приведено выше). Русский перевод этой книги был напечатан в «Вестн. общ. технологов» за 1898 и 1899 гг.

при этом температура значительно превышает температуру воспламенения применяемого горючего вещества; после этого производится постепенный впуск топлива, и потому сгорание, вследствие движения поршня и вызываемого этим расширения сжатого воздуха (соответственно газа) происходит без значительного повышения давления и температуры; по окончании впуска топлива происходит дальнейшее расширение находящейся в цилиндре массы газа.

2) Конструктивное выполнение означенного в п. 1 способа, при котором к рабочему цилиндру присоединяется насос для предварительного сжатия с промежуточным резервуаром и цилиндром для последующего расширения в целях многоступенчатого сжатия или при котором несколько рабочих цилиндров спарены между собою или с названными цилиндрами для предварительного сжатия и последовательного расширения.

В описании патента приводятся еще следующие соображения под рубриками S и T.

Характерные особенности способа будут при этом следующие: возрастание температуры и давления почти до их максимальных значений не через сгорание, а благодаря сжатию чистого воздуха перед сгоранием; следующее затем производство работы путем постепенного сгорания в продолжение заранее предписанной части расширения, характеризуемой определенным и устанавливаемым распределительным механизмом периодом впуска топлива. По вышесказанному, самосгорание, в противоположность известным до сего времени способом сжигания, не вызывает значительных повышений температуры; наивысшая температура достигается сжатием воздуха и мы в состоянии удерживать ее в умеренных пределах; так как кроме того последующее расширение вызывает сильное охлаждение газов, то исключается необходимость в искусственном охлаждении стенок цилиндра и необходимая для практического хода машины средняя температура, обусловленная смазкой и плотностью органов, достигается исключительно вышеописанным способом, в чем также заключается его отличие от всех известных до настоящего времени конструкций. В сочинении Дизеля идеи, кратко изложенные в его патенте, находят теоретическое обоснование. Дизель говорит сначала о «новой теории горения». В этой теории Дизель делает некоторую ошибку, считая, что при сгорании углерода в углекислоту первоначальный объем газа увеличивается в отношении суммы весов воздуха и горючего вещества к весу воздуха. На самом деле, при сгорании 1 кг углерода с $^8/_3$ кг кислорода получится объем углекислоты как раз тот же, который был занят кислородом до сгорания. Эта ошибка усложняет все вычисления Дизеля и приводит его, например, к явно неверному результату, что коэффициент полезного действия цикла Карно равен не: $1 - \frac{T_2}{T_1}$,

а: $$1 - \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{g}}$$

(где g — вес топлива, T_1 — температура верхнего источника тепла, T_2 — низшего), т. е. несколько больше того, что следует. Но особенного

влияния на расчеты Дизеля эта ошибка не оказывает. За идеальный двигатель Дизель принимает цикл Карно с изотермическим сгоранием и делает примерный расчет такого двигателя мощностью в 100 л. с., причем у него получается максимальное давление, равное 250 атм., максимальная абсолютная температура, равная 1073°, коэффициент полезного действия, равный 0,73 (по правильной формуле для цикла Карно—0,727). При этом у Дизеля получается еще практически неосуществимое количество воздуха, именно на 1 кг угля 99,324 кг воздуха; между тем количество необходимого воздуха для сжигания 1 кг равно $\frac{32}{12 \cdot 0{,}23} = 11{,}6$. Таким образом, получается избыток воздуха в $\frac{94{,}324}{11{,}6} = 8{,}56$, вместо обыкновенно промеряемого в позднейших дизельмоторах, равного 1,7—1,8. Для практического осуществления Дизель рекомендует «отклоняющийся процесс» («abweichender Prozess») с одним только адиабатическим сжатием (вместо первоначально изотермического, вызываемого впрыскиванием воды, а затем только адиабатического). При этом максимальное давление получается при той же температуре конца сгорания равным только 90 атм. и коэффициент полезного действия процесса —0,71 (вместо давления конца сгорания, равного 89,8 и коэффициента полезного действия процесса, равного 0,73). Последний отдел книги Дизеля посвящен вопросу приложения нового двигателя. В этом отделе особенно подчеркивается вероятное значение нового двигателя для мелкой промышленности. Это значение Дизелем характеризуется вполне в духе идей Рело и его последователей, о которых мы говорили выше. Дизель считает, что этот двигатель «будет противодействовать развитию централей». При этом мелкая промышленность будет, по его мнению, размещаться в окрестностях городов или даже в деревнях, а «не быть централизованной в городах без света, без воздуха и без достаточного пространства». Наряду с этим упоминаются и другие возможные приложения нового двигателя: к крупной промышленности, к локомотивам, к экипажам, к передвижению судов.

Таковы были в общих чертах основы намеченного способа работы к осуществлению «видоизмененного двигателя»: в нем соединены основные принципы «идеального двигателя»: достижение путем сжатия чистого воздуха температуры, достаточной для воспламенения топлива, вводимого в самом конце сжатия, горение без повышения температуры (а следовательно, и без водяного охлаждения). В топливе — главное внимание обращается на угольный порошок, но упоминается и о жидком топливе.

Сочинение Дизеля обратило на себя большое внимание и вызвало ряд критических оценок, по большей части отрицательных;[1] некоторые

[1] Одно из самых правильных указаний было сделано Келером (вышеупомянутым автором сочинения о газовых двигателях). Он указывает именно на односторонность взглядов Дизеля, на исключительное значение только термического коэффициента полезного действия; полный коэффициент полезного действия есть произведение термического к. п. д. на механический к. п. д. и величину последнего нельзя игнорировать. Очевидно, Келер считал, что при больших давлениях, предположенных у Дизеля, меха-

из сделанных замечаний были вполне правильны и справедливость их подтвердилась позднейшими изменениями, которые самому Дизелю пришлось внести в первоначальную идею двигателя при дальнейших работах по ее осуществлению. Но, на ряду с отрицательными отзывами, были и положительные и притом принадлежащие очень крупным авторитетам — Линде, Цейнеру и Шретеру. Хотя они и не были напечатаны, но все-таки дали Дизелю возможность заинтересовать в своем изобретении крупные капиталистические предприятия: Крупна и Общество Аугсбургских машиностроительных заводов. Фирма Круппа давала средства на производство опытов, а Аугсбургский завод предоставлял для производства опытов свое помещение и техническое оборудование; договор с Аугсбургским заводом был подписан 21 февраля 1893 г., а с фирмой Круппа—10-го апреля того же года.

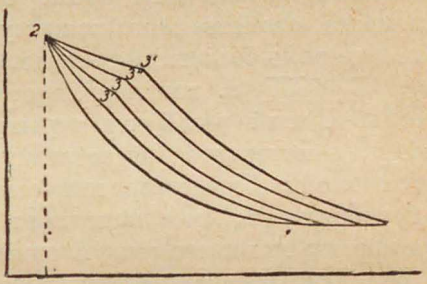
После этого начался долгий период осуществления работоспособного опытного двигателя. [1] Первый двигатель, в котором изобретатель хотел осуществить принципы, высказанные в патенте и в его сочинении, был готов уже в июле 1893 г. Сжатие должно было быть доведено в этом двигателе до 90 атмосфер, а температура конца сжатия до 800°, охлаждение не должно было применяться, за нормальное рабочее тело принят был угольный порошок, компрессора не было и топливо вводилось прямо насосом. Двигатель был пущен в ход от трансмиссии, но при первой же попытке введения горючего (бензин) произошел взрыв, уничтоживший индикатор и едва не повлекший за собой увечья для самого Дизеля. Вскоре, в июле же, был построен с некоторыми изменениями второй двигатель, с которым удалось получить одну вспышку на бензине. Третий двигатель, исполненный тоже с некоторыми изменениями, был испытан 18 августа того же года. Он дал уже отдельные самостоятельные движения холостого хода. Однако, неудача этих первых двигателей убедили Дизеля в необходимости изменить процесс сгорания, отказаться от идеи изотермического сгорания и перейти к сгоранию приблизительно при постоянном давлении (т. е. по изобаре), так как при сгорании по изотерме получалась слишком малая площадь индикаторной диаграммы, т. е. слишком малая работа в цилиндре двигателя, даже недостаточная для преодоления вредных сопротивлений, т. е. для сообщения двигателю только холостого хода. На необходимость этого отказа от изотермы указывали и некоторые критики работы Дизеля. В соответствии с этим новым взглядом на процесс работы в двигателе Дизель берет новый патент (№ 821168, от 30 ноября 1893 г.), являющийся дополнением к его основному патенту. В патенте этом говорится о способе регулирования двигателя «путем видоизменения характера кривой процесса сгорания» и приведен чертеж (фиг. 162), показывающий эти разные кривые сгорания. Очевидно тем самым

нический к. п. д. будет мал. Это мнение подтвердилось не только в опытных двигателях Дизеля, но даже и в практически осуществленных; только значительно позже удалось в них достигнуть высокого механического коэффициента полезного действия.

[1] История этого периода подробно изложена в сочинении Дизеля: «Die Entstehund des Dieselomotors», Berlin, 1913.

допускаются другие кривые сгорания, кроме первоначально предложенной изотермы. Однако, введение сгорания при постоянном давлении чрезвычайно повышало температуру конца сгорания рабочей смеси в цилиндре: хотя сжатие воздуха и было понижено до 35—40 атмосфер и, в соответствии с этим — температура конца сжатия получилась около 600°, но температура конца сгорания получается около 1 500°, что необходимо влекло за собой введение водяного охлаждения и тем приближало двигатель Дизеля к типу обыкновенных двигателей.

Однако и при изменении характера процесса сгорания все трудности далеко не были превзойдены: двигатель 1894 г. тоже давал еле заметный холостой ход. Только в двигателе, построенном в начале 1895 г. и испытанном в марте 1895 г., удалось достигнуть более благоприятных результатов, причем в нем введено было водяное охлаждение. Для распыливания жидкого горючего (керосина, применяемого в этих опытах), применялся сжатый воздух, доставляемый компрессором, соединенным с двигателем. Введены были и другие конструктивные усовершенствования, например, распределительный валик, находившийся первоначально внизу двигателя, перенесен был наверх, что значительно облегчило распределительные органы двигателя и улучшило их работу. 1 мая 1895 г. двигатель этот дал непрерывную работу в течение получаса, а через 2 недели мог работать даже с нагрузкой.



Фиг. 162

После этих удачных опытов с опытными двигателями можно было перейти к постройке двигателя, годного для крупных испытаний и для работы на производстве. Эта постройка заняла, однако, еще много времени и только в конце 1896 г. Дизель мог написать Круппу, финансирующему производившиеся опыты, об успешной постройке рабочего двигателя.

Двигатель этот работал с большими отступлениями от первоначальных предложений Дизеля. Работа в нем производилась так, как она осуществляется в дизельмоторах почти без изменения до настоящего времени. Работа производилась за 4 такта, как и в двигателе Отто: в первом такте всасывался чистый воздух, во втором — он сжимался приблизительно до 35 атмосфер, причем происходило сильное повышение температуры воздуха (до 500—600° С). В этот раскаленный воздух в самом конце 2-го хода начинало вводиться горючее (керосин). Подача керосина происходила через форсунку, куда он доставлялся насосом, а распыливание керосина производилось сжатым воздухом, подаваемым в ту же форсунку (форсунка помещалась в крышке цилиндра). Сжатие распыливающего воздуха доводилось до 50—60 атмосфер. Сгорание происходило без заметного повышения давления, приблизительно по изобаре; сгорание продолжается на 1/6 , 1/5 части третьего хода поршня, после чего происходит

до конца хода расширение продуктов сгорания. Во время расширения давление падает до $2^1/_2$ атмосфер, т. е. расширение применяется как и в двигателях, работающих по принципу Отто, неполное. Во время четвертого такта происходил выпуск продуктов сгорания в атмосферу.

Распределение производилось клапанами, помещенными наверху крышки цилиндра. Клапанов было 5, из них один служил для впуска керосина через форсунку, другой — для всасывания воздуха и третий — для выпуска продуктов сгорания. 2 остальных клапана служили для впуска и выпуска сжатого воздуха в период пуска двигателя в ход. Сжатый воздух доставлялся компрессором, приходящим в движение от балансира; воздух этот проходил через резервуары, в которых таким образом всегда получался запас для пуска двигателя в ход.

Регулирование двигателя достигалось изменением продолжительности впуска горючего под действием центробежного регулятора. Цилиндр был снабжен водяным охлаждением. Передача движения поршня к валу достигалась в этом двигателе через крейцкопф, шатун и кривошип (двигатель был простого действия). Маховик отличался большим весом, что естественно, так как кроме большой неравномерности вращательного момента, свойственного всякому четырехтактному двигателю, здесь играла еще роль большая отрицательная работа сжатия во втором ходе.

В 1897 г. начался период крупных испытаний нового двигателя. Целый ряд фирм, строивших паровые машины и газовые двигатели, заинтересовался к этому времени двигателем Дизеля, слухи об успешной работе которого проникли в широкие круги: фирмы эти желали приобрести заранее концессии на право производства этих двигателей и потому они хотели через своих представителей убедиться в их достоинстве. Так, еще раньше были заключены договоры с фирмой братьев Карельс (Carels) в Генте, с фирмой Коккерилля в Льеже и с французской фирмой Фредерик Диккоф в Бар ле Дюке. В феврале 1897 г. опыты с двигателем Дизеля производили представители завода Отто-Дейтц и завода бр. Зульцер в Винтертуре. Около того же времени опыты с новым двигателем произведены были проф. Гутермутом (Gutermuth) по поручению Нюренбергского машиностроительного завода (впоследствии слившегося с Аугсбургским машиностроительным заводом и образовавшим фирму «МАН» («MAN» — «Maschinenfabrik Augsburg — Nürnberg») и французским профессором Соважем (Sauvage) по поручению французских фирм.

Но особенное значение имели обширные опыты, произведенные в феврале же 1897 г. проф. Шретером и его ассистентами. Отчет об этих опытах лег в основание докладов Дизеля и Шретера, прочитанных на съезде Общества немецких инженеров летом 1897 г.[1] в Касселе.

Таким образом, опытом было показано, что расход керосина в новом двигателе при полной нагрузке достигает около 0,24 кг на эфф. л. с. час. Теплотворная способность (рабочая) применяемого керосина была точно определена при помощи калориметра Малера и оказалась равной 10 206

[1] Доклады эти были напечатаны в Z.d.VDI, 1897, а также выпущены отдельным изданием: Diesels rationeller Wärmemotor». Berlin, 1897.

Таблица 6

Показатели	Полная нагр.		Половин. нагр.		Холостой ход
	I	II	III	IV	V
1) Расход керосина в час кг . .	4,92	4,24	2,66	2,72	1,88
2) Эффективная мощность л. с.	19,87	17,82	9,58	9,84	—
3) Расход керосина на эфф. л. с.	0,247	0,238	0,278	0,276	—
4) Расход керосина на инд. л. с.	0,185	0,180	0,161	0,165	—

кал/кг. Таким образом, экономический коэффициент полезного действия получается равным $\frac{632,3}{10206 \cdot 0,24} = 0,25$. Результаты эти являлись в то время чрезвычайно благоприятными, так как тогда обыкновенные керосиновые двигатели расходовали около 0,4 кг/эфф. л. с. керосина, что при той же теплотворной способности соответствует коэффициенту полезного действия равному 0,155.

Что касается механического к. п. д., то он оказался, как и следовало ожидать, не очень большим, а именно равным около 0,75.

Разрез опытного двигателя изображен на фиг. 163.

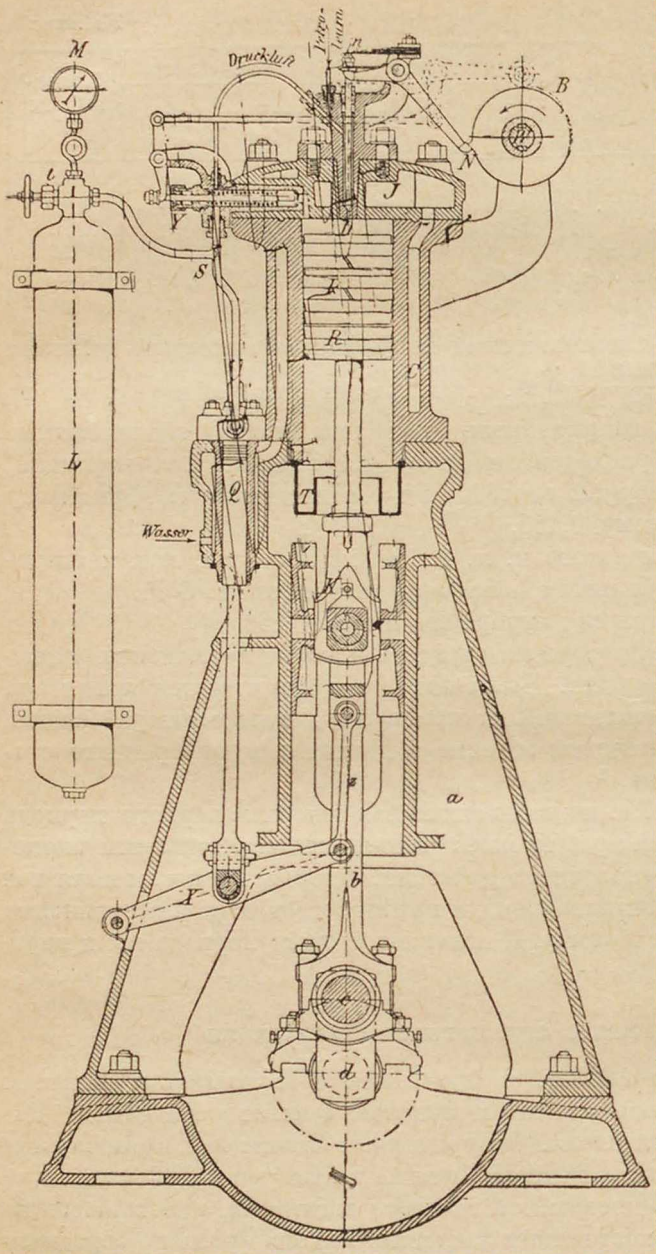
Доклады Дизеля и Шретера на съезде Общества германских инженеров имели громадный успех. Было ясно, что открывается новая эра в постройке тепловых двигателей и что в лице дизельмотора создан сильнейший конкурент паровой машине и двигателям внутреннего сгорания более ранних типов. [1]

Эту дату — лето 1897 г. можно считать завершением первого периода дизелестроения — создания работоспособного двигателя с высоким экономическим коэффициентом полезного действия. Вторым периодом является выработка надежного в эксплоатации и пригодного для распространения двигателя («marktfähiger Motor»). К изложению этого периода мы и переходим.

Конструктивное осуществление двигателя

Удачные испытания 1897 г. и прочитанные Шретером и Дизелем доклады являются кульминационным пунктом деятельности самого Дизеля по созданию его двигателя. Он продолжал опыты над применением угольной пыли в своих двигателях, но они не имели успеха. Так же мало успеха имели и опыты с постройкой газового двигателя, работавшего по принципу сгорания при постоянном давлении. Главная роль по осуществлению пригодного для длительной эксплоатации двигателя перешла прежде всего к Аугсбургскому машиностроительному заводу. На этом заводе был построен в 1897 г. первый двигатель для промышленных целей,

[1] Автор настоящего сочинения сам находился в это время в Германии и писал в Россию в этом смысле об изобретении Дизеля, сравнивая значение этого изобретения с изобретением Уатта.



Фиг. 163

именно 60-сильный двухцилиндровый двигатель для спичечной фабрики в Кемптене. Но двигатель этот оказался крайне неудачным: неудовлетворительно работали насос для подачи горючего, форсунка, компрессор; клапаны и поршни пропускали газы, сжатые до высокого давления. На многих других заводах, приобревших право производства двигателей Дизеля, построенные двигатели оказались тоже обладающими большими дефектами (особенно неудачно работал завод Ватсона в Англии) и на некоторых из них производство дизелей было даже прекращено. Эти неудачи подорвали первоначальное доверие к новому изобретению, которое сменилось крайним пессимизмом. Было очевидно, что правильная идея двигателя 1897 г. нуждалась в гораздо более совершенном конструктивном и производственном оформлении. В этом трудном процессе главная заслуга принадлежит деятелям Аугсбургского машиностроительного завода, и Дизель принимал в этом фазисе развития двигателя малое участие. В этом отношении он является интересным примером эволюции роли изобретателя в раннюю эпоху капитализма и в позднем его фазисе: первые предложения паровых двигателей являлись всецело созданиями своих изобретателей; можно с полным основанием говорить о машине Севери,

Папина или Ньюкомена. Уже в осуществлении предложения Уатта очень большую роль играет участие капиталиста и заводчика Болтона. Стефенсон сам является владельцем завода, но одновременно с его заводом работают и другие заводы и тип паровоза делается очень скоро довольно обезличенным. В создании дизельмотора это разделение функций изобретателя и завода, оформляющего изобретение, проявляется особенно ярко, как и во многих позднейших изобретениях и усовершенствованиях.

Интересные сведения об этом трудном для Аугсбургского завода периоде приведены в докладе доктора-инженера Лаустера (Lauster) на общем собрании Общества немецких инженеров в Аугсбурге в 1925 г. [1] Этот инженер работал сам с 1896 г. над осуществлением дизельмотора. Сразу же после опытов Шретера Аугсбургский завод начал постройку двигателя в 60 л. с. для спичечного завода в Кемптене, но с этим-то двигателем и начались затруднения и надежда на успех стала оставлять даже многих сотрудников, работавших по этому делу.

Неудачи двигателя в Кемптене составляли предмет постоянных разговоров в самом Кемптене и в Аугсбурге, и эти разговоры пагубно действовали на работников по дизелестроению, которые притом были предоставлены собственным силам, так как сам Дизель не принимал уже участия в дальнейшей разработке двигателя, а занят был своим заводом мелких быстроходных дизельмоторов, которые тоже не имели успеха. Дело усовершенствования дизельмоторов было поддержано директором Аугсбургского завода, Буцом, который путем больших жертв со стороны Аугсбургского завода, работы по ночам и во время остановок, добился успешной работы мотора на фабрики в Кемптене. Все ответственные части дизельмотора: поршень, крышка цилиндра с клапанами, распылитель, игла для впуска топлива, впускной вентиль, нефтяной насос, воздушный насос, цилиндры для пуска в ход и распыливания топлива — должны были быть переконструированы, материалы для их изготовления и способы обработки изменены и доведены до большой степени точности. Окончательный успех кемптенского двигателя и даже хорошая работа некоторых других, построенных Аугсбургским заводом двигателей не создали еще перелома в отношении к дизельмотору, и его положение окончательно упрочивается только к 1899 г., когда Аугсбургским заводом было изготовлено 14 двигателей с общей мощностью около 500 л. с.

Упорная работа Аугсбургского машиностроительного завода, а затем и других заводов привели к благоприятным результатам: уже на выставке в 1899 г. в Мюнхене было представлено 5 двигателей Дизеля: Аугсбургского машиностроительного завода, завода Отто-Дейтц и Круппа. Эта выставка произвела благоприятный переворот в отношении технического мира к дизельмотору, поколебленного в период неудач. Эта перемена повлекла за собою ряд новых договоров о лицензиях на право производства дизельмоторов. Между прочим, к этому производству окончательно перешел завод бр. Зульцер в Винтертуре; заключен был также договор с Л. Э.

[1] См. сборник «Diselmaschinen» II, изданный VDI в 1926.

Нобелем о постановке производства дизельмоторов на его заводе в Петербурге, [1] причем для более тесной связи производства этих двигателей в России, заграницей было основано в Нюрнберге специальное «Русское общество двигателей Дизеля».

Еще больший успех имел Дизель на всемирной выставке 1900 г. в Париже. [2] На выставке этой было представлено несколько двигателей Дизеля: наилучшим из них был двигатель завода Аугсбург-Нюрнберг в 60 эфф. л. с., двигатель в 50 эфф. л. с. Французского общества постройки дизельмоторов и 3 небольших двигателя в 10—20 л. с. Французского общества газовых двигателей. Двигатели эти и вообще принцип работы дизельмоторов нашли очень хвалебную оценку в отчетах о выставке. [3]

Сам Дизель прочел о своем двигателе большой доклад на конгрессе по прикладной механике, происходившем в связи с выставкой, в Париже в июле 1900 г. [4] Доклад вызвал оживленные прения, в которых принимали участие проф. Гирш, Рато, Гюберт, Дешан, Ришар и др. В следующем заседании проф. Г. Ф. Деп сделал сообщение об опытах, произведенных им в 1899 г. над двигателем Дизеля, построенным на заводе Нобеля в Петербурге, и давших тоже очень благоприятные результаты.

Развитие дизелестроения в Европе и Америке в довоенном периоде

Успехи дизельмоторов на Парижской выставке снова побудили целый ряд заводов поставить у себя дизелестроение; оно начато было на заводах Бурместер и Вайн в Дании, Хик-Харгривс в Англии, завод в Граце (Австрия) и Будапеште и др.

В принципе работа дизелей на этих заводах не отличалась от работы аугсбургских двигателей, но каждый завод вносил свои усовершенствования и конструктивные изменения.

Распространению дизельмоторов в Германии, не имевшей своей нефти, содействовала возможность применять в этих двигателях каменноугольную смолу (Steinkohlenteer), [5] получающуюся как побочный продукт при сухой перегонке каменного угля. В других странах перешли (по примеру России) [6] к применению в дизельмоторах нефти.

Областью первоначального применения дизельмоторов были отдельные заводские установки (первоначально малых мощностей) и неболь-

[1] Возникновению и развитию построения дизельмоторов в России мы посвящаем отдельный отдел.

[2] Сведения о выставленных двигателях имеются в статье в сборнике «Méchanique à l'Exposition de 1900, 4-me fascicule.

[3] Например, у того же Дешан, который, однако, с основанием скептически относится к возможности применять в дизельмоторах газ и твердое топливо.

[4] Доклад Дизеля напечатан в отчетах о конгрессе; прения по докладу, ч. II, стр. 53.

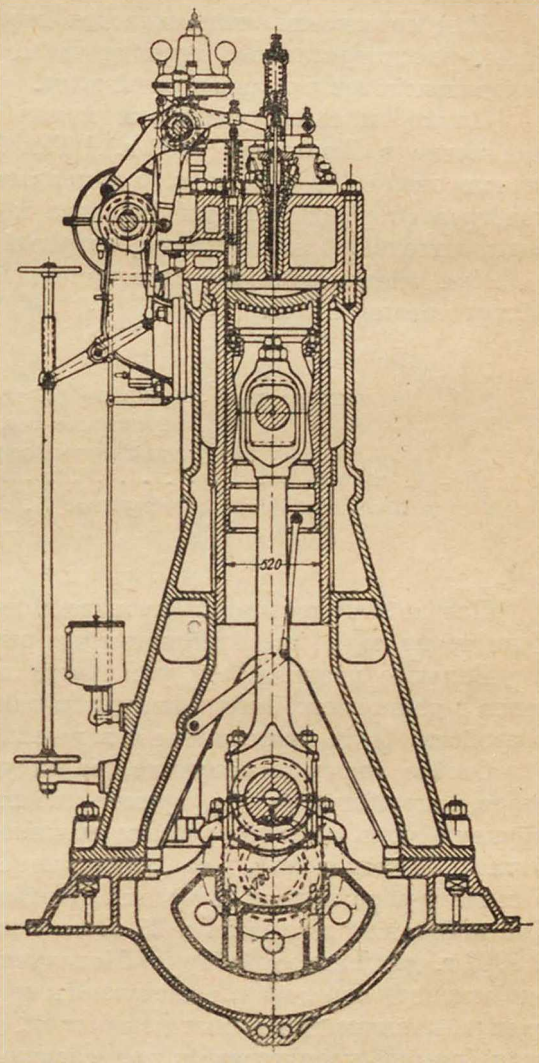
[5] Характеристика продуктов сухой перегонки угля, применяемых в Германии в дизельмоторах, имеется у Güldner'a в «Verbrennungsmotoren», стр. 463 и след., изд. 1914.

[6] О дизелестроении в России будет говориться со стр. 302.

шие электрические станции.[1] Но вскоре появилась неизбежно связанная с капитализмом тенденция к укрупнению отдельных двигателей и к завоеванию ими более обширных областей промышленности. Это увеличение мощности дизельмоторов шло по нескольким путям: увеличивалось число цилиндров (до 4—6, редко 8), увеличивалась мощность, получаемая в одном цилиндре путем увеличения размеров его, применялся принцип двойного действия в одном цилиндре (т. е. работа с обеих сторон поршня); наконец, некоторыми заводами стал применяться двухтактный процесс, который сам по себе почти удваивает мощность, получаемую в одном цилиндре.

На фиг. 164 представлен разрез типичного крупного четырехтактного трехцилиндрового двигателя позднейшего времени завода Аугсбург-Нюрнберг.

(Ne—эффективная мощность — 450 эфф. л.с., D— 520 мм, S = = 780 мм, число оборотов n =155).



Фиг. 164

На фиг. 165 изображен в разрезе двухтактный двигатель завода Зульцера с прямоточной продувкой. Двигатели такой системы строились заводом Зульцера уже до войны мощностью до 2 400 эфф. л. с. Внешний вид такого двигателя изображен на фиг. 166.

Что касается экономичности работы двигателей Дизеля, то довольно быстро был достигнут предел: расход около 180—185 г нефти на лошадиную силу час, что приблизительно соответствует величине полного экономического коэффициента полезного

[1] Первый дизельмотор, исследованный автором в 1902 г., был двигатель в 10 л. с. Аугсбургского машиностроительного завода, поставленный на электрической станции Народного дома в Киеве.

действия, равной 0,35 ($\eta_{эк} = \frac{632,3}{10000 \cdot 0,18} = 0,35$). На этой высоте этот коэффициент держится до самого новейшего времени, когда в некоторых испытаниях новейшего времени коэффициент этот повысился до 36—38%.

Для повышения экономичности дизельных установок в позднейшее время рассматриваемого периода стала применяться утилизация тепла отходящих газов и охлаждающей воды.

Примером такой установки можно привести устройство на бумагопрядильне в Бюрглене (1908 г.).[1] Там был поставлен дизельмотор мощностью около 300 эфф. л. с. с утилизацией отходящих газов в особом подогревателе воды системы Зульцера и с использованием охлаждающей воды, выходящей из двигателя, нагретой до 55—57°.

При этом, в наиболее благоприятном опыте, получилось следующее распределение тепла:

	в %
Количество тепла, превращаемое в эфф. работу . . .	34,0
» » перешедшее в охлажд. воду . . .	28,7
» » использованное в газовом подогревателе	15,9
Количество тепла, потерянное	21,4
Всего	100%

Позднейшие испытания, произведенные самим Готтингером [2] в 1911 г., дали точно такие же благоприятные результаты.

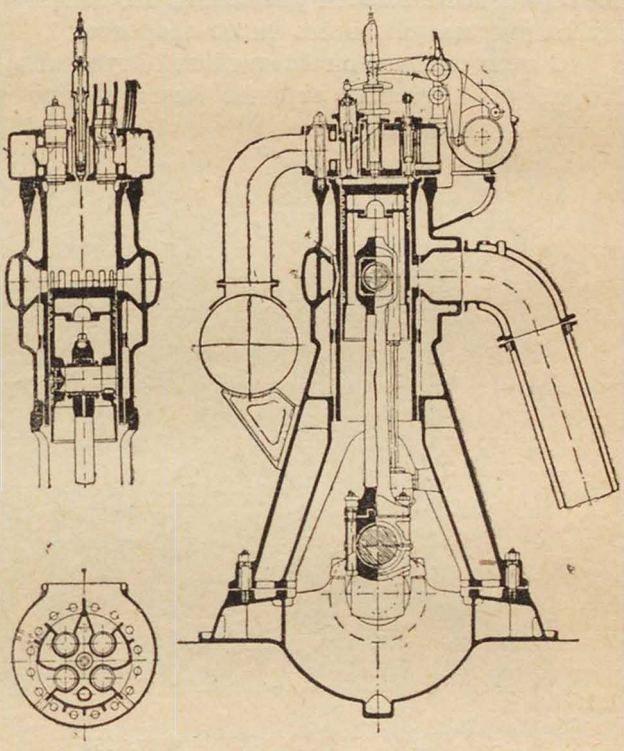
Большое развитие эти устройства для использования отходящего тепла в двигателях Дизеля получили в послевоенное время (аналогичные устройства были применяемы и в газовых двигателях).

Особое значение получило, на ряду с распространением дизельмоторов в промышленности, применение их на судах. В этом применении крупную роль сыграли русские машиностроительные заводы — Л. Нобеля и Коломенский, но здесь пока мы будем говорить только о западно-европейских заводах. Первым судовым двигателем Дизеля был небольшой двигатель в 25 л. с., построенный заводом Соттер-Гарле в 1903 г. для железной барки «Маленький Пьер», снабженный механической сменной передачей от двигателя к гребному винту. Но такая передача годилась только для малых двигателей, для больших же двигателей Дизеля большое препятствие к применению на судах представляла необходимость особого устройства для реверсирования двигателя при заднем ходе судна. Это реверсирование, легко достигаемое при паровых машинах с помощью кулисс, долгое время не могло быть осуществлено в двигателях Дизеля. Трудность устройства реверса в двигателе Дизеля состояла в том, что он сам по себе, как и всякий двигатель внутреннего сгорания, не может быть пущен в ход вследствие того, что в нем нет силового резерва

[1] Hottinger, Die Wärmeausnützung bei Dieselmotoren, Z. d. VDI, стр. 673, 1911.

[2] Cochand und Hottinger, Versuche an einer 300-Pferdiger Dieselmotorenanlage mit Abdampfverwertung, Z. d. VDI, стр. 458, 1912.

(каковой имеется в паровой установке в паровом котле); трудность пуска его в ход еще усиливается вследствие высокого сжатия, применяемого в этих двигателях. В стационарных двигателях пуск в ход достигается применением сжатого воздуха, который имеется как необходимый элемент в двигателе Дизеля. До пуска выключается сжатие, и тогда двигатель пускается в ход сжатым воздухом (для чего имеется специальный клапан). Когда двигатель пришел в движение, то пускают нефть и, когда начнутся воспламенения, включают сжатие.



Фиг. 165

В реверсивном двигателе все эти операции должны быть сделаны на ходу. Прежде всего двигатель должен быть остановлен путем выключения топливных насосов и клапанов, затем рычаги и ролики прямого хода должны быть приподняты и переставлены ролики обратного хода. После этого должны быть введены в действие пусковые клапаны, причем двигатель начнет вращаться в обратном направлении и, наконец, должны быть выключены пусковые клапаны. Все эти манипуляции должны быть сделаны автоматически поворотом одной или двух ручек и весь реверс должен быть исполнен в очень короткое время. После того как Аугсбургскому заводу удалось добиться устройства реверсирования, начала довольно быстро развиваться постройка моторных судов с дизелями.

Кроме завода Аугсбург-Нюрнберг, их начали строить завод Зульцера, Карельс в Бельгии, Бурместер и Вайн в Дании, Блом и Фосс в Гамбурге и некоторые другие.

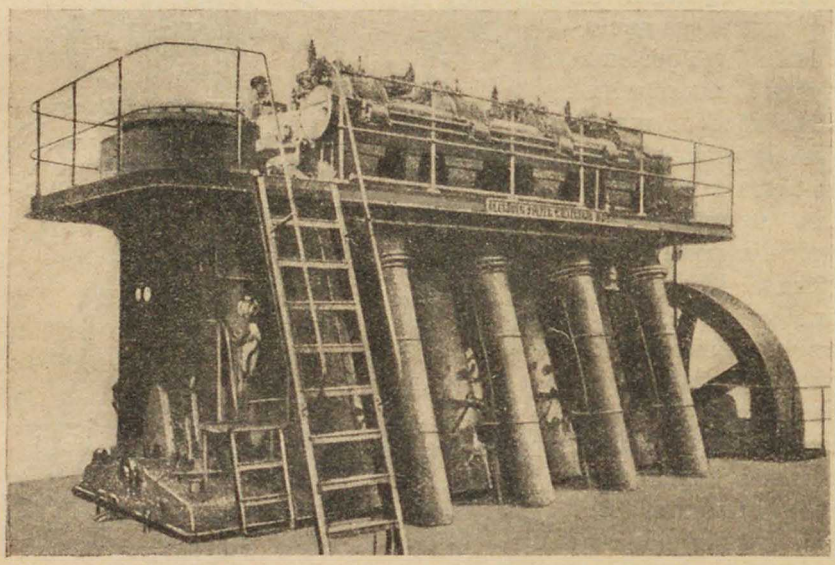
Двигатель завода Бурместер и Вайн довоенного времени (1901 г.) изображен в разрезе на фиг. 167.

Двигатель 6-цилиндровый, общей индикаторной мощностью в 1000 л. с., нормально число оборотов —150 в минуту ($D=540$, $f=730$, $n=623$).

Очень скоро после постройки первых грузовых и пассажирских «теплоходов», как принято было называть по-русски суда с дизельмоторами (по-немецки — «Motorschiff», по-английски —«motorship»), возник вопрос

о применении их в военном флоте в качестве главных судовых двигателей. Вопрос этот имел большую остроту, так как все державы деятельно готовились к предстоящей войне. Однако, для крупных военных судов размеры тогдашних дизельмоторов были далеко недостаточны. Зато большое значение получило применение дизельмоторов для приведения в движение подводных лодок (при плавании их на поверхности и для зарядки аккумуляторов). Но для этого применения необходимо было до последней возможности уменьшать вес двигателя, а это влекло за собой необходимость увеличить число оборотов.

В этом отношении блестящих результатов достиг завод Аугсбург — Нюрнберг, начавший строить быстроходные дизели с числом оборотов



Фиг. 166

350—450 в минуту; немецкие подводные лодки с этими моторами сыграли громадную роль в мировой войне. Создание этих быстроходных двигателей имело большое значение как в послевоенной практике построения дизелей, так и в возбуждении ряда теоретических вопросов по динамике двигателей, по крутильным колебаниям валов, имеющим большое значение и в современной технике. Исследование относящихся сюда вопросов и обзор литературы даны на русском языке Л. К. Мартенсом. [1]

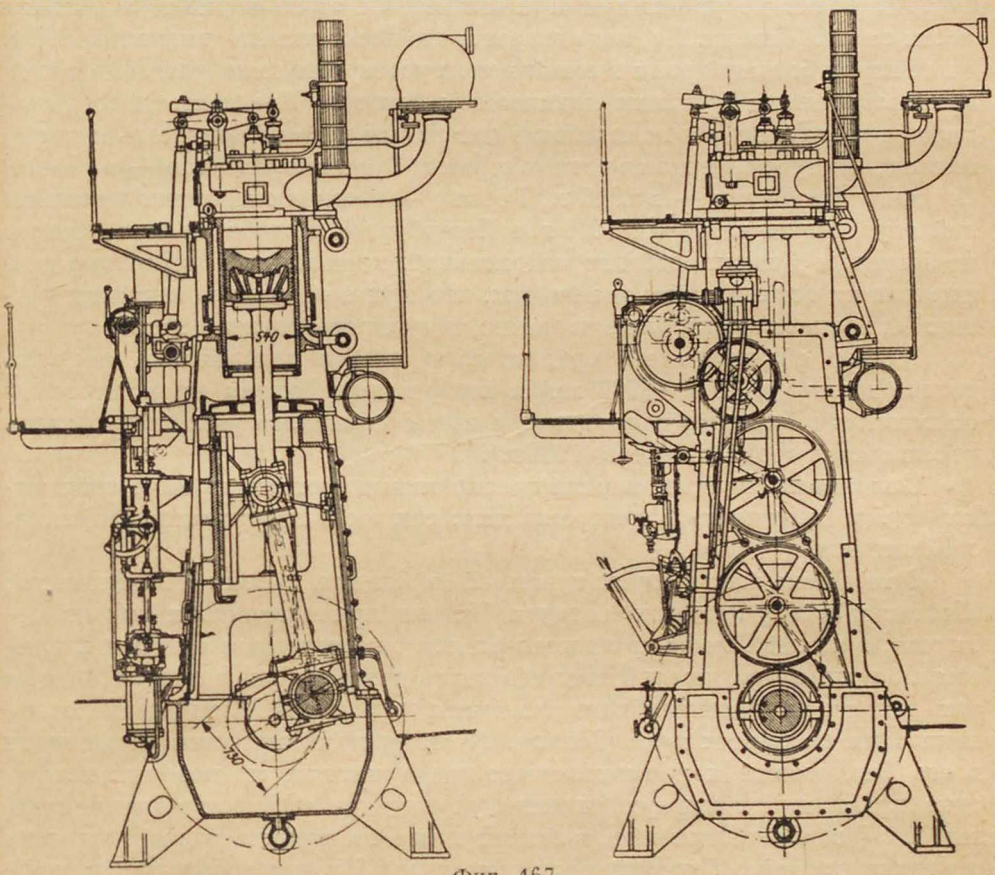
Быстроходный двигатель для подводной лодки завода МАН изображен на фиг. 168.

Этот двигатель построен был во время войны для многочисленных немецких лодок крупного типа.

---

[1] Л. К. Мартенс. Динамика поршневых двигателей, Москва, 1932 г.

Развитие постройки быстроходных двигателей для больших подводных лодок [1] во время войны шло на заводе МАН быстрыми шагами: завод этот начал с постройки двигателей мощностью в 1 200 л. с. при шести цилиндрах, которые были построены в большом количестве (мощностью в одном цилиндре, равной 200 л. с.); затем он увеличил мощность в одном цилиндре до 300 л. с., так что получил двигатель шестицилиндровый, мощностью в 1750 л. с., а затем увеличил число цилиндров до 10 и получил двига-



Фиг. 167

тель, изображенный на фиг. 168 . Общая мощность его —3030 эфф. л. с. Число оборотов — n=390, $n_{max.}$=410, $n_{min.}$=70—90, D=530, S=530, Pe=5,96 атм. Pi=7,86 атм. Вес машины — 74 тонны, что дает 24,4 кг на л. с.

Наконец, возбужден был вопрос и о применении дизелей к локомотивам: с 1907 г. завод Зульцера приступил к разработке этого вопроса. Конструкция дизельлокомотива Зульцера была закончена в 1911—1912 гг.,

[1] Эти крупные подводные лодки назывались в Германии «подводными крейсерами» («U-Boot-Kreuzer»).

но построенный дизельлокомотив оказался неудачным,[1] так как не приняты были во внимание специальные требования железнодорожного дела: необходимость повышенного тягового усилия, следовательно, и среднего индикаторного давления в период трогания с места и при прохождении подъемов.

Таким образом, задача построения тепловозов перенесена была на позднейшую эпоху.

Мы почти не упоминали при изложении этого периода о деятельности самого Дизеля. Но, надо сказать, что после успеха двигателя 1897 г. он не играл большой роли в техническом усовершенствовании двигателей, производившемся большим количеством заводов. Его деятельность сводилась, главным образом, к защите патентных прав на двигатель и к пропаганде его путем поездок в разные страны (Францию, Англию — в 1911 г., Соединенные Штаты — в 1912 г., Россию — в связи с выставкой двигателей внутреннего сгорания 1910 г. в Петербурге). Борьба за свои патенты не была для Дизеля особенно интенсивной, хотя имелись серьезные данные для их оспаривания: мы видели, что при несравненно меньших данных был оспариваем и даже частично аннулирован патент Отто.

Ридлер объясняет это сравнительно слабое оспаривание тем, что долгое время (до 1902—1903 гг.) к изобретению Дизеля его конкуренты относились с большим недоверием, а затем оставалось уже мало времени до окончания срока патентов (1908 г.).

С главными же возможными противниками достигнуто было соглашение путем денежного вознаграждения; так было поступлено, например, с Капитеном.

В то время, как везде за границей (в Англии, России и Соединенных Штатах и даже Франции) заслуги Дизеля признавались и высоко ценились, в самой Германии он подвергался ожесточенным нападкам, притом в эпоху, когда уже патенты его давно потеряли свою силу. Нападки эти не имели практического значения, но крайне болезненно отзывались на состоянии духа Дизеля. К этому присоединялся ряд неудач в его финансовых и промышленных предприятиях, из которых только одно представляет интерес, именно учреждение «Общества малых двигателей Дизеля» в Мюнхене, в задачи которого входила разработка конструкции особенно быстроходных двигателей Дизеля небольшой мощности. Но идея эта, получающая осуществление как раз в настоящее время в виде быстро распространяющихся быстроходных дизельмоторов автомобильного и авиационного типа, для этой эпохи являлась еще далеко не созревшей, двигатели оказались мало пригодными и Обществу пришлось прекратить свою деятельность.

Участие в этом деле окончательно подорвало финансовое положение Дизеля.

Все эти обстоятельства, в связи с общей болезненностью Дизеля, вызывавшей у него и раньше периоды подавленного настроения, вызвали

[1] См. статью проф. А. Н. Шелеста, «Исследование тепловоза бр. Зульцер в Швейцарии». «Вестн. инженеров», № 3, 1917.

у Дизеля в 1913 г. чрезвычайный упадок сил и утомление жизнью. Однако, он продолжал свои деловые поездки и в конце сентября 1913 г. выехал в Гент, где на выставке представлен был превосходный экземпляр дизельмотора, исполненный заводом бр. Карельс (в Генте). Из Гента он выехал в Антверпен, где 29 сентября сел на пароход, идущий в Англию; в последней Дизель должен был сделать ряд докладов и решить некоторые деловые вопросы. Вечером же 29 сентября он расстался со своими спутниками, но утром 30-го уже не был найден в своей каюте (в которой все вещи его оказались в порядке). Вся совокупность обстоятельств заставляет предположить, что он окончил жизнь самоубийством, бросившись ночью в море.

Так печально окончил свою жизнь несомненно один из самых крупных немецких изобретателей. Его отступления от первоначальной идеи двигателя нисколько не уменьшают значения достигнутого им успеха. Напротив того, они характеризуют гибкость его ума, позволившего ему удачно видоизменить первоначальную идею, не приводившую к благоприятным практическим результатам. Его настойчивость в деле осуществления работоспособного двигателя 1897 г., его дальнейшая настойчивая пропаганда этого двигателя характеризуют Дизеля как в высшей степени жизненного и активного изобретателя.

Оторванность же его от конструктивного оформления двигателя, способного к широкому распространению, является, как мы говорили, следствием обстоятельств того периода развития капитализма, в котором он работал.

Возникновение и развитие дизелестроения в России в дореволюционном периоде

Из всех областей теплотехники дизелестроение является областью, в которой дореволюционная Россия дала наиболее крупные и самостоятельные достижения. Это объясняется рядом благоприятных условий:

1) Дизельмотор являлся двигателем, наиболее подходящим для сравнительно не очень крупных отдельных заводских предприятий, преобладавших в дореволюционной России.

2) Топливо для дизеля — нефть — являлось одним из наиболее важных природных богатств России, стоявшей в этом отношении уже и в дореволюционном периоде в условиях, гораздо более благоприятных, чем страны Западной Европы.

3) Постройка дизельмоторов началась в России почти одновременно с Западной Европой. Поэтому конкуренция гораздо более сильного западно-европейского машиностроения меньше чувствовалась в этой области, чем в других областях, тем более, что на тяжелых дизельмоторах высокая покровительственная пошлина, введенная в России в 90-х годах прошлого столетия, отзывалась особенно чувствительно. [1]

[1] Тем не менее дизельмоторы завода МАН имели большое распространение в России, особенно в Юго-западном крае, в первом десятилетии XX в., благодаря превосходно поставленному представительству этой фирмы в Киеве. Дизельмоторов русских или других заграничных фирм в эти годы в этом крае не приходилось встречать.

Мы упоминали уже, что право на производство дизельмоторов получено было Нобелем уже в 1899 г. [1]

Л. Гумилевский [2] правильно указывает, что одним из главных мотивов для покупки Э. Нобелем права на производство дизельмоторов являлось желание увеличить сбыт своей нефти. Нобель являлся главным собственником нефтяных земель и производителем нефти в дореволюционной России. Но, с другой стороны, несомненно в этом приобретении играло роль и желание дать более четкую специализацию механическому заводу Нобеля в Петербурге, который до тех пор строил самые разнообразные предметы военного снаряжения, разные машины и только между прочим небольшие керосиновые двигатели. В том же 1899 году на заводе Нобеля в Петербурге был построен первый двигатель Дизеля для работы на нефти. Этот переход с керосина на нефть имеет самое существенное значение для распространения дизельмоторов.

Двигатель этот был испытан проф. Г. Ф. Деппом [3] в том же году и показал отличные эксплоатационные качества: легкость пуска в ход и спокойный ход, полноту сгорания, хорошее регулирование и плавную работу при малых нагрузках; последним качеством не отличались простые нефтянки, регулируемые помощью выключения впуска горючего; расход нефти отказался равным 0,24 кг нефти на л. с. ч., т. е. оказался значительно меньше , чем в обыкновенных нефтяных двигателях (которые тратили 0,4 кг на л. с. ч.). В ближайшие годы завод Нобеля стал строить дизельмоторы с мощностью в 20 и 30 л. с. в одном цилиндре, причем строил одно- и двухцилиндровые двигатели. В конструкцию этих двигателей были внесены многие самостоятельные элементы, отличавшие ее от конструкции Аугсбургского завода. Так, например, у Нобеля была применена для этих двигателей бескрейцкопфная конструкция, сильно уменьшившая высоту двигателя и принятая скоро и заграничными заводами для дизельмоторов малых мощностей.

Первые двигатели Нобеля были поставлены на Орудийном заводе в Петербурге и на насосной станции для перекачивания керосина в Баку. Последняя установка отличалась уже значительными размерами, так как состояла из 3 агрегатов по 100 л. с. Завод Нобеля вскоре перешел к постройке двигателей в 50 и 75 л. с. в одном цилиндре.

Комбинируя несколько таких цилиндров, можно было получить двигатели крупных мощностей.

---

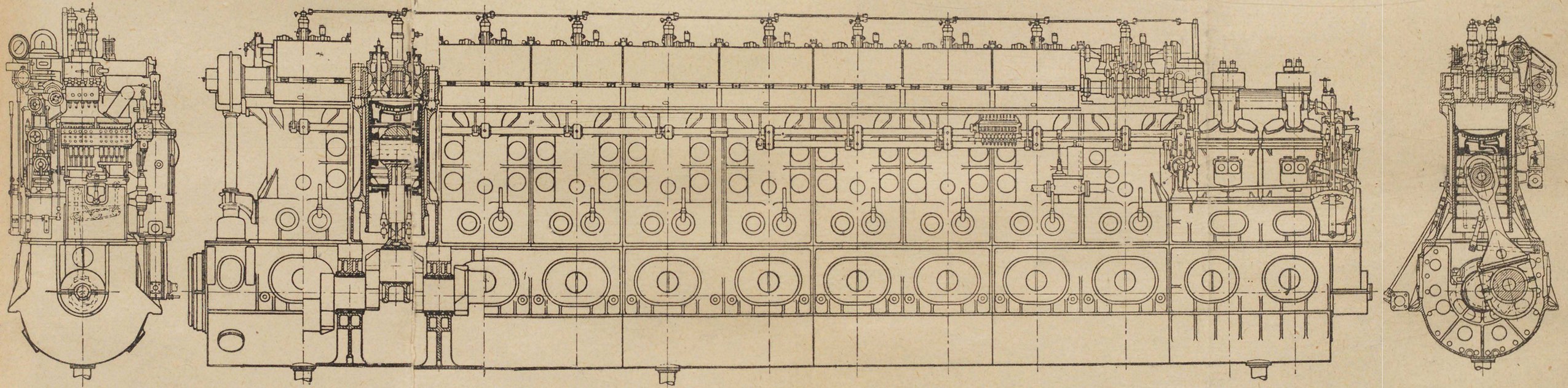
[1] Основным материалом по дизелестроению в России является издание «Двигатели внутреннего сгорания в СССР». Москва, 1927.

Специально о построении дизельмоторов на заводе Нобеля ценные сведения имеются в юбилейном издании «Механический завод Л. Нобель». Петербург, 1862—1912.

Много данных по дизелестроению в России имеется также в цитированной книге Л. Гумилевского и в приведенной в этой книге журнальной литературе.

[2] Л. Гумилевский, цит. соч., стр. 137 и др.; автор сообщает, что за патент и первые чертежи Э. Нобелем была заплачена сумма в 50 тыс. ф. ст. (стр. 56).

[3] Г. Ф. Депп. Опыты с двигателями Дизеля на заводе Нобеля. Зап. Русск. технич. общ. № 1, 1901.



Фиг. 168

В дальнейшем на заводе Нобеля стало быстро увеличиваться производство дизельмоторов, применявшихся на разных заводах, мельницах, химических заводах, небольших электрических станциях. Во всех этих установках дизеля ставились с ременной передачей, что представляло для электрических станций некоторые неудобства. В 1907 году завод Нобеля поставил на электрической станции Электротехнического института в Петербурге двигатель в 80 л. с., непосредственно соединенный с динамомашиной. Эта конструкция нашла применение в дальнейшем на русских электрических станциях. Станция в Астрахани с такими двигателями изображена на фиг. 169. Рост производства дизельмоторов на заводе Нобеля показан в таблице 7.

Успех дизельмоторов побудил и некоторые другие русские заводы перейти к их постройке: этим занялись заводы — Коломенский, Фельзера в Риге, Харьковский паровозостроительный завод, Николаевский судостроительный завод.

Таблица 7

Годы	Число двиг.	Мощность эфф. л. с.
1899	1	20
1900	7	190
1905	46	2 490
1910	54	10 270
1913	64	11 840

Особенно большое значение в развитии дизелестроения в России имело применение их на судах, т. е. постройка теплоходов. Развитие этой постройки описано (кроме вышеназванной книги «Двигатели внутреннего сгорания в СССР») в статьях Д. Д. Филиппова.[1] Интересные сведения по истории этого вопроса приведены в статье проф. К. П. Боклевского.[2] Специально о применении дизельмоторов в русском военном флоте говорится в статье проф. Г. Бубнова.[3] В отношении постройки теплоходов русские заводы, особенно завод Нобеля и Коломенский, шли часто впереди западно-европейских, что объясняется теми благоприятными экономическими условиями, о которых мы уже говорили.

Первая судовая установка дизельмотора была исполнена в 1903 г. для нефтеналивной баржи «Вандал», делающей рейсы по Волге. Для обхода трудностей реверсирования в ней применена была электрическая передача через динамомашину от двигателя к гребному валу. В том же году началась разработка другой системы передачи, предложенной инженером Дель Пропосто, работавшим на заводе Л. Нобеля. В этой системе электрическая передача включалась только для обратного хода судна,

[1] Д. Д. Филиппов. Возникновение, развитие и ближайшие задачи применения двигателей внутреннего сгорания для торгового и военного флота России. Труды деятелей по двигателям внутреннего сгорания, Петербург, стр. 72, 1911.

Д. Д. Филиппов. Дизель в торговом и военном флоте. Вестн. инженеров, № 10, 1924 и № 4, 1925.

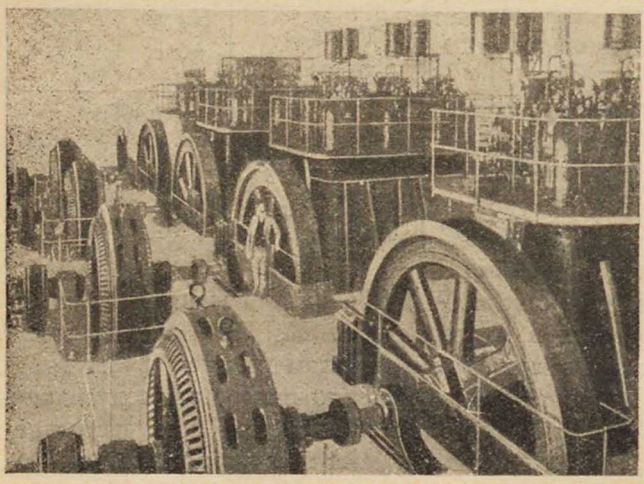
[2] Проф. К. П. Боклевский. Страничка из истории применения дизельмоторов на русских судах, Теплоход, № 1—2, 1911. В том же номере помещена статья (неподписанная автором) «Теплоходы русского торгового флота».

[3] Проф. Г. Бубнов. Двигатели Дизеля и русский военный флот.

при ходе его вперед применялось непосредственное соединение двигателя с гребным винтом.

Для осуществления этой идеи двигатель соединялся непосредственно с динамомашиной. Продолжение их вала соединялось с гребным винтом посредством электромагнитной муфты, включенной при переднем ходе судна; при обратном ходе судна эта муфта расцеплялась, и вводился в действие электромотор, соединенный с гребным валом. Эта установка была поставлена на нефтеналивном судне «Сармат», делавшем рейсы по Волге и по Каспийскому морю. Двигателей там было поставлено два, по 180 л. с., соединенные каждый вышеупомянутым способом со своим гребным винтом. Нормальное число оборотов было равно 240.

Хотя электрическая передача по системе Дель Пропосто и являлась вполне удобной, однако, она отличалась все же сложностью и дороговизной. Поэтому завод Нобель продолжал искать другого решения вопроса, именно —путем создания дизель-моторов с непосредственным реверсированием. Сначала завод Нобеля предполагал устроить реверсивный двухтактный двигатель, так как казалось, что при двухтактном процессе реверсирование легче осуществить, чем при четырехтактном. Но уже в 1906 г. была поставлена задача конструирования четырехтактного реверсивного двигателя для подводной лодки «Минога». Этот двигатель был готов в 1908 г. Реверсирование в нем достигалось путем простых операций, и весь процесс реверсирования требовал не больше 10—12 секунд.



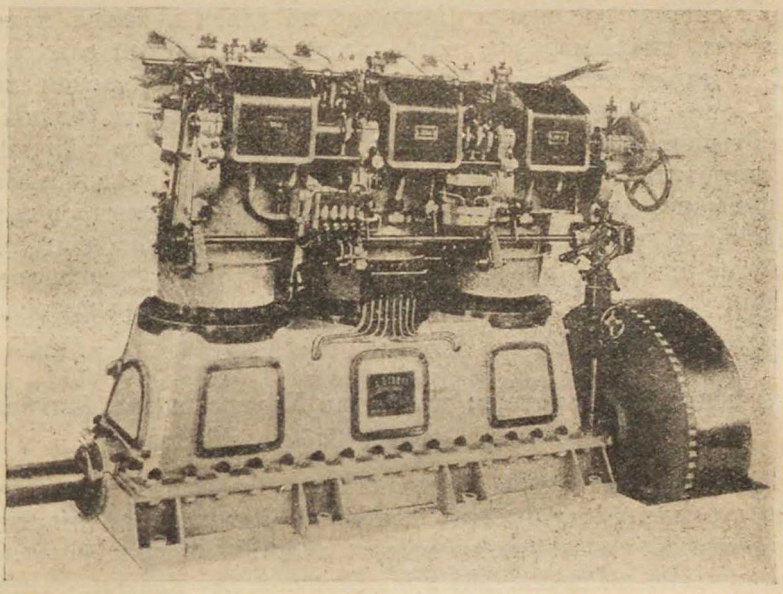
Фиг. 169

Подробные и тщательные опыты, произведенные с этим реверсивным двигателем Дизеля в 1908 г. проф. Н. А. Быковым,[1] показали его прекрасные качества во всех отношениях, как в отношении надежности действия и простоты реверсивного механизма, так и в отношении расхода нефти, который оказался равным около 0,2 кг на л. с. ч. при мощности только около 120 эфф. л. с. и 400 оборотах в минуту. Эти результаты, а также и самые опыты Н. А. Быкова обратили на себя большое внимание и за границей.

[1] Н. А. Быков. Применение реверсивных двигателей внутреннего горения на судах и испытания реверсивного двигателя. Вестн. общ. технологов, № 8, 1909.

Одновременно с «Миногой» аналогичные реверсивные двигатели были поставлены на подводной лодке «Акула», а затем на буксирных судах «Самоед» и «Беломор» и на некоторых нефтеналивных баржах.

В 1910 г. завод Нобеля поставил свои двигатели на канонерских лодках «Карс» и «Ардаган», предназначенных для службы в Каспийском море. На каждой из них было поставлено по 2 реверсивных двигателя по 500 л. с. каждый (и, кроме того, дизельмоторы же применялись на этих судах для приведения в движение вспомогательных механизмов). Суда эти с большим успехом совершили трудный переход по системе каналов и по Волге из Балтийского моря в Каспийское, что показало полную пригодность дизельмоторов для судовой службы.



Фиг. 170

Вскоре после этого завод Нобеля перешел к постройке быстроходных легких моторов, специально пригодных для подводных лодок.

В этой отрасли дизелестроения завод Нобеля также достиг больших успехов: вес двигателя был уменьшен с 14—8 пудов (224—128 кг) на л. с. (вес принятого в стационарных двигателях того времени) до 3 пуд. (48 кг) на л. с. в быстроходных двигателях в 180 эфф. л. с. при 2 400 оборотах в минуту, поставленных на канонерских лодках. В быстроходных двигателях подводных лодок завод Нобеля еще снизил вес на единицу силы и довел его в одном из двигателей в 180 л. с., построенных в 1912 г., даже до 20—25 кг на л. с. [1]

Быстроходный двигатель завода Нобель изображен на фиг. 170.

[1] Двигатель для подводной лодки «Сом» — 160 эф. л. с., 460 оборотов.
Э. П. Вайнберг. Завод Русский дизель. Дизелестроение, № 1, 1932.

В последнее время перед войной (в 1913 г.) завод Нобеля стал строить двухтактные судовые двигатели для Общества «Кавказ и Меркурий» по 800 л. с. и для военного флота по 1320 л. с. (8-цилиндровые двигатели с весом по 35 кг на эфф. л. с.). [1]

На ряду с заводом Нобеля, большие достижения в области судового дизелестроения имел также Коломенский завод.

Он начал тоже с постройки дизелей с электрической передачей, но в отличие от завода Нобеля применял при этом пневматическую соединительную муфту Корейво. Такие установки были поставлены на ряде буксирных судов. Первым из них было буксирное судно «Мысль», построенное в 1907 г. Название «теплоход» было впервые применено именно к этому судну. [2]

Но в скором времени и Коломенский завод перешел к постройке реверсивных дизельмоторов, воспользовавшись опытом завода Нобеля. В 1911 г. такой двигатель был построен на пассажирском теплоходе «Урал». Затем Коломенский завод построил целый ряд больших пассажирских теплоходов, первым из которых был «Бородино». [3] Шестицилиндровый двигатель «Бородино» отличался полной уравновешенностью, особенно важной для пассажирского судна, для избежания в нем неприятных периодических колебаний. В конструировании этого двигателя большое участие принимал проф. В. П. Аршаулов. [4] Это уравновешение еще с большим успехом было достигнуто на теплоходе «Царьград», построенном на Коломенском заводе в 1913 г. [5]

Видоизменения дизельмотора: двигатели Хазельвандера, Литценмейера, Тринклера, Бронса, Сабатэ, Юнкерса

Появление двигателей Литценмейера, Бронса и Тринклера было вызвано стремлением упростить двигатель Дизеля. В настоящее время они потеряли свое значение, но незадолго до войны приобрели некоторое распространение в России. Мы приводим поэтому краткие замечания об этих двигателях. [6]

Первый патент Хазельвандера был взят в 1897 г. (20 октября), а затем он много лет работал над усовершенствованием своего двигателя, который исполнялся некоторыми немецкими заводами (Маффеи в Мюнхене и др.). Идея его первоначальной конструкции была — осуществление

[1] Ваншейдт, «Двухтактный судовой реверсивный двигатель Дизеля постройки завода Л. Нобель». Вестн. инженеров, № 8, 1916.

[2] «Теплоход», № 1—2, 1911, стр. 6.

[3] «Теплоход», № 7—8, 1911.

[4] В. П. Аршаулов. Об уравновешении сил инерции в двигателях Дизеля. «Теплоход», 1912 г.

[5] В. П. Аршаулов. Теплоход «Царьград». «Теплоход», 1915 г.

[6] Сведения о двигателях Тринклера, Литценмейера и Бронса имеются в докладе Г. Б. Тринклера на съезде деятелей по двигателям внутреннего сгорания («Труды съезда», стр. 137). Доклад этот является очень интересным документом по истории развития этих двигателей.

бескомпрессорного двигателя; распыливание у него производилось сжатием в кольцевом пространстве в верхней части рабочего цилиндра воздуха, получаемым вследствие применения дифференциального поршня. Воздух этот проводится в форсунку и производит разбрызгивание топлива. Но при этом верхний выступ дифференциального поршня подвергался все время действию горячих газов и быстро сгорал. Производство двигателей Хазельвандера было скоро прекращено.

Г. Б. Тринклер — русский инженер, известный конструктор Сормовского завода, тоже много работал над своим двигателем, первый патент на который был заявлен в 1896 г., но в этом патенте было отказано вследствие сходства предложения с двигателем Горнсби.

В позднейшем своем предложении (на которое был получен патент в 1904 г.) Г. Б. Тринклер тоже предложил применять особый поршень, вызывающий сжатие воздуха и распыливание нефти. Идея Г. Б. Тринклера была принята к исполнению заводом Кертинга, но поршенек этот тоже являлся слабым местом двигателя и быстро сгорал, а потому двигатель Г. Б. Тринклера тоже не получил распространения, хотя и обратил на себя внимание за границей и вызвал сочувственный отзыв Витца. [1]

Двигатель Литценмейера был построен около 1906 г. и представлял некоторое соединение способа работы двигателей Хазельвандера и Тринклера со способом работы обыкновенного дизельмотора: нефть подается насосом в форсунку, сообщающуюся с внутренностью цилиндра, но разбрызгивалась воздухом, который сжат компрессором. Литценмейер работал одно время у Кертинга в качестве помощника Тринклера и создал свою комбинацию под влиянием последнего (в ней играло роль, конечно, также желание обойти патент Дизеля). Двигатель Литценмейера строился в России на заводах Бромлея в Москве и на Сормовском заводе; он исполнялся в виде горизонтального двигателя и получил известное распространение в России.[2] Впоследствии постройка его не продолжалась.

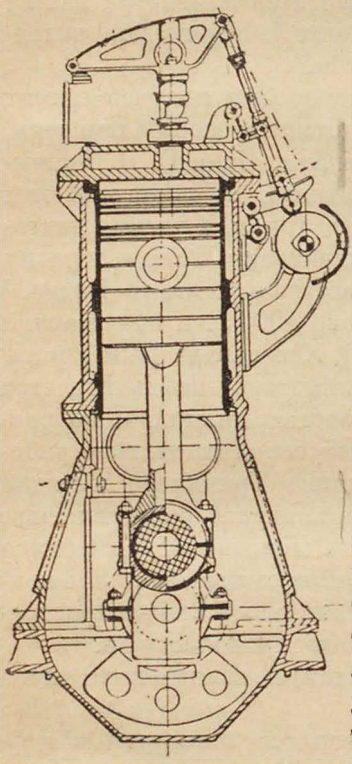
Двигатель Бронса (голландского изобретателя) появился тоже около этого времени.

Двигатель Бронса является средним между дизельмотором и нефтянкой. Сжатие воздуха в нем доведено до 30—32 ата, но распыливание делается не посредством компрессора, а посредством местного взрыва в камере, куда подается нефть. В этом отношении двигатель Бронса

[1] A. Witz. Dernière évolution du moteur à gas, стр. 407—409. История попыток Г. Б. Тринклера добиться поддержки русских заводов для осуществления своей идеи чрезвычайно поучительна для характеристики экономической и промышленной отсталости дореволюционной России. Если бы эта поддержка была оказана (в размере, несравненно меньшем, чем это сделали немецкие капиталисты для Дизеля), то весьма вероятно, что из двигателя Тринклера выработался бы раньше, чем за границей, тип бескомпрессорного дизеля.

[2] Двигатели Литценмейера и Бронса Сормовского завода были представлены на выставке в Екатеринославле, где подвергались испытаниям и получили высшие отличия. Отчет об этих испытаниях имеется в книге Д. П. Титова «Опытное исследование двигателей внутреннего сгорания».

является предшественником некоторых систем позднейших бескомпрессорных дизельмоторов. Подобно тому, как и в последних, сгорание в двигателе Бронса происходит сначала со взрывом, а затем на некотором участке продолжается при постоянном давлении, как показывает индикаторная диаграмма, приведенная в докладе Б. Г. Тринклера. Таким образом, двигатель Бронса является примером осуществления смешанного цикла, который, однако, носит имя французского инженера Сабате (Sabathé), построившего быстроходный двигатель в 700 л. с., работающий по этому смешанному циклу, в 1909 г. [1] для миноносца (фиг. 171).



Фиг. 171

Термодинамическое исследование этого цикла дано Зейлигером (Seiliger). [2]

Двигатель со смешанным циклом строился Блекстоном (Blackstone) в Англии около того же времени. [3]

Двигатель Юнкерса представляет собой довольно существенное видоизменение двигателя Дизеля. Рабочий процесс у него приблизительно тот же, что и в двигателе Дизеля, но он имеет два поршня в одном цилиндре, движущиеся друг другу навстречу («двигатель с противоположно движущимися поршнями»). [4]

Раньше Юнкерса (в 1903 г.) тип дизельмотора с противоположно движущимися поршнями предлагался заводом Соттер Гарле, но не получил распространения, так как детали его не могли быть как следует разработаны в виду недостаточной практики с дизелями обыкновенного типа. Юнкерс работал долго вместе с Эхелльгейзером, газовые двигатели которого также имеют противоположно движущиеся поршни, но работают по циклу Отто.

После долгих самостоятельных исследований над процессом горения в дизельмоторах Юнкерсу удалось выработать требования к конструкции двигателей внутреннего сгорания и построить опытный двигатель. Затем он перешел к постройке более

---

[1] La téchnique moderne, февраль, 1909.

[2] Seiliger, Z. d. VDI, стр. 627, 1911.

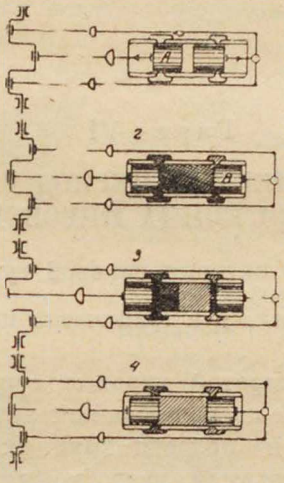
[3] Génie civil, 21 августа 1909.

[4] Сведения о довоенном типе двигателей Юнкерса имеются в докладе его на съезде деятелей по двигателям внутреннего сгорания. Труды съезда, Петербург, 1911, и в статье проф. В. С. Наумова «Дизеля с противоположно движущимися поршнями». Вестн. инженеров, №№ 17, 18, 1915.

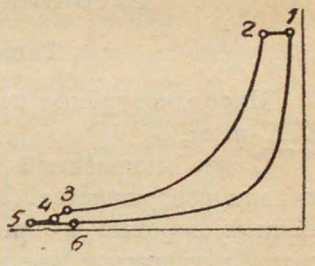
мощных двигателей, которая, впрочем, вследствие начавшейся вскоре войны не получила особенного развития.[1]

Схема работы двигателя Юнкерса изображена на фиг. 172.

В положении 1 сжатый воздух наполняет пространство между поршнями, начинается сгорание и поршни расходятся. Затем начинается расширение. Когда поршень *A* открывает отверстие в цилиндре, начинается выпуск продуктов сгорания (положение 2 на рисунке). Почти одновременно с этим поршень *B* открывает свои отверстия и через них впускается воздух, прополаскивающий цилиндр (положение 3 на рисунке). При обратном движении поршней поршень *A* закрывает свои отверстия и выпуск газов прекращается, а затем, когда и поршень *B* закрывает свои отверстия (положение 4), начинается вновь сжатие воздуха. Теоретическая диаграмма процесса в двигателе Юнкерса изображена на фиг. 173. 1—2 — сгорание при постоянном давлении (поршни расходятся). 2—3 — расширение (поршни продолжают расходиться). 3—4 — выпуск газов через отверстия, открытые поршнем *A*. 4—5 — продувка до конца хода. 5—6 — продолжение продувки при обратном ходе до начала сжатия в точке 6. О двигателях типа Юнкерса мы будем еще говорить.



Фиг. 172



Фиг. 173

Заметим еще, что почти одновременно с Юнкерсом был построен опытный двигатель Дизеля с противоположно движущимися поршнями по системе инженера Коломенского завода Р. А. Корейво. Двигатель этот тоже был выставлен на выставке двигателей внутреннего сгорания 1910 г. в Петербурге, но производство этих двигателей не получило развития.

Описание двигателя Корейво помещено в той же статье проф. В. С. Наумова.

[1] Постройка быстроходных двигателей Юнкерса была начата еще до войны на заводе Всеобщая компания электричества, AEG. Mitteilungen, июль 1913.

Глава VI

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ПЕРВЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ (ДО КОНЦА МИРОВОЙ ВОЙНЫ)

Ранняя история паровой турбины

Паровая турбина появилась в технически применимом виде в конце XIX века.

С необыкновенной быстротой паровые турбины достигли высокой степени совершенства. Уже ко времени начала мировой войны они вытеснили паровые машины из области крупных электрических станций и стали строиться для мощностей, недоступных для других двигателей.

Это победное шествие турбины, замедленное войной, возобновилось после окончания последней; послевоенное время поставило перед турбостроением ряд новых проблем чрезвычайной важности.

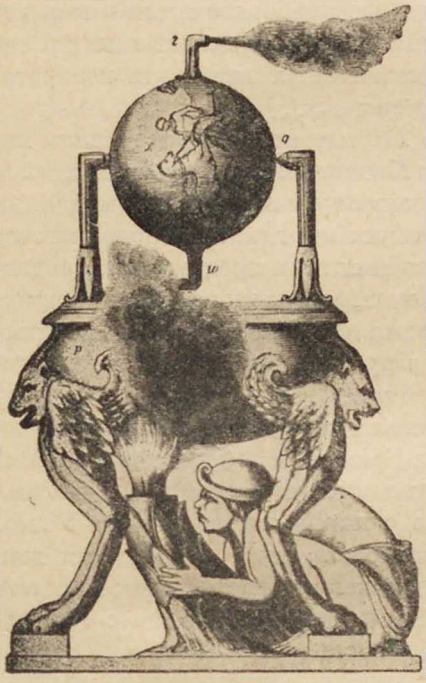
Поэтому развитие паровых турбин представляет собой одну из интереснейших страниц в истории техники.

Паровую турбину можно определить как двигатель, имеющий непрерывное вращательное движение и состоящий из неподвижной и подвижной частей, причем работа двигателя получается за счет падения давления и теплосодержания пара, переходящих сначала в неподвижных частях (полностью или частично) в кинетическую энергию, которая затем уже переходит в полезную работу в подвижных частях турбины.

Из этого определения видна большая простота паровой турбины в кинематическом отношении по сравнению с паровой машиной. Достаточно вспомнить те трудности, которые пришлось преодолеть Уатту в его стремлении создать машину с непрерывным вращательным движением, получающимся через преобразование прямолинейного возвратного движения поршня: он ввел механизм параллелограма — балансир, а в первых машинах еще и «планетную» зубчатую передачу к главному валу машины. С другой стороны, очевидным является сходство паровой турбины с водяными двигателями (из старых двигателей, особенно с подливным колесом, работающим тоже кинетической энергией воды; эта энергия получается через преобразование первоначальной высоты напора воды). Эти обстоятельства дали возможность возникновения идеи паровых турбин уже на ранних ступенях техники, значительно раньше, чем паровых машин. Таким образом появились известные предложения Геронова шара (1-е

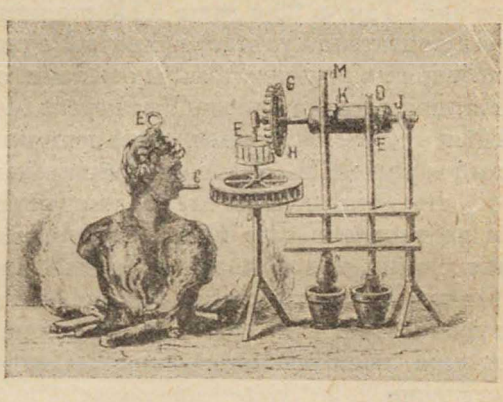
столетие до начала нашей эры) и Бранка (начало XVII столетия) (фиг. 174 и 175).

У Леупольда [1] и Белидора [2] упоминается еще «огненное колесо» Амонтона (Amonton), проект которого был представлен в Парижскую академию наук около 1700 г. Действие его описано крайне неясно; оно представляло, повидимому, комбинацию действия силы пара и воды, так же как и проект турбины Кемпелена (Kempelen), на который был взят патент одновременно со вторым патентом Уаттом в 1784 г. [3]



Фиг. 174

Однако, для приложения в промышленности идеи, положенной в основу этих аппаратов, отсутствовали все необходимые предпосылки: экономические условия, знание свойств рабочего агента (газа или пара), понимание процессов преобразования энергии и надлежащий уровень технологических процессов. Самое создание паровой



Фиг. 175

турбины требовало, как мы увидим дальше, знания свойств газа и пара и законов их истечения. Наконец, изготовление паровой турбины возможно только при высоком уровне технологической техники, так как связано с применением специальных металлов и методов чрезвычайно точной обработки металлов. Таким образом, турбины Бранка и т. п. представляли собой скорее занимательные физические приборы и только значительно позже явились прототипами двух главных классов паровых турбин. Мысль изобретателей парового двигателя пошла, как мы видели, по пути создания поршневого двигателя с прямолинейным возвратным движением.

---

[1] Leupold. Theatrum machinarum, гл. II, § 397.
[2] Belidor. Architecture hydraulique, § 1279.
[3] Neilson. The Steam Turbine, стр. 17—19.

Двигатель этот, с небольшим числом оборотов (10—25), вполне удовлетворял потребностям промышленности того времени. Однако, идея непосредственного получения в паровом двигателе вращательного движения тоже проявлялась в это время, но она пошла как у самого Уатта, так и у большинства его преемников не по пути создания паровой турбины, а по пути изобретения ротативных паровых двигателей, т. е. двигателей, имеющих непрерывное вращательное движение, но в которых пар также постепенно расширяется, как в паровой машине, и производит работу просто этим понижением давления, без преобразования в кинетическую энергию, характерного для паровой турбины. Создание таких ротативных двигателей сделалось одной из излюбленных задач для изобретателей в XIX в. (и продолжается даже до сих пор).

Так, в Англии до 1859 г. было взято 210 патентов на ротативные машины, [1] а в Соединенных Штатах в музее Патентного учреждения имелся в 60-х годах отдельный большой шкаф, доверху наполненный моделями ротативных двигателей. [2] Предложение таких двигателей продолжалось и позже, несмотря на неудачи в осуществлении всех предыдущих предложений. Так, в 90-е годы XIX столетия некоторое распространение получил двигатель Гульта,[3] принятый одно время для приведения в движение небольших вспомогательных механизмов в русском военном флоте и изготовлявшийся на заводе Лесснера в Петербурге. Такие двигатели предлагались даже после распространения паровых турбин, например, ротативный двигатель в 350 л. с. был выставлен на Брюссельской выставке 1910 г.[4]

Все эти двигатели не получили никакого технического значения и не входят в наш обзор. Одновременно с паровыми машинами Уатта, имеющими непрерывное вращательное движение, и с ротативными двигателями появляются, однако, и предложения настоящих паровых турбин. Так, сам Уатт [5] думал также и о паровой турбине, но с обыкновенной своей проницательностью видел большие трудности при ее осуществлении.

После этого появляется ряд предложений паровых турбин, представляющих, однако, по большей части, только измененные типы Геронова шара и не могущих получить практического осуществления. Так, в 1791 г. была предложена паровая турбина Садлера (James Sadler), пред-

---

[1] C. Matschoss, цит. соч., т. 1, стр. 477 и след.

[2] M. Eyth. Wanderbuch eines Ingenieurs. Leipzig, 1886, т. II, стр. 128.

[3] Z. d. VDI, стр. 1672, 1908.

[4] В. М. Маковский. Успехи паровой техники. Екатеринослав, стр. 132—133, 1911.

[5] K. Sosnowski. Roues et turbines à vapeur. Paris, 1897 г., стр. 6.

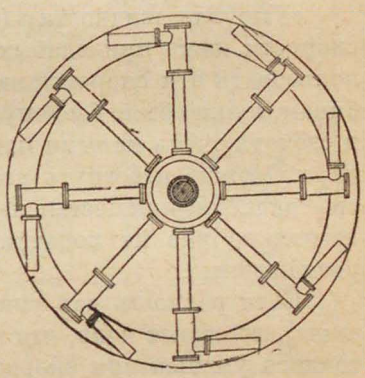
В этой книге собран обширный материал по первоначальным патентам на конструкции паровых турбин. Другим сочинением с большим подбором старых патентов и содержащим вообще большое количество сведений по истории паровых турбин является книга R. Neilson «The Steam Turbine», London, 1908. В ней приведен, между прочим, полный список английских патентов на паровые турбины и детали до 1905 г. Приведенный в книге Нельсона материал дополняет данные книги Сосновского.

ставляющая некоторое развитие турбины Герона (или Сегнерова колеса), в которой следует отметить намеченное применение конденсации.[1] К тому же реактивному типу колес принадлежат турбины Т. Пиля (Th. Peel, 1823 г.), Реаль (Real, 1827 г.), Фенеон (Fénéon, 1828 г.), Жакме (Jacquemet, 1837 г.) и др. [2]

Как пример, приводим одну из этих конструкций, именно Фенеона (фиг. 176).

В 1839 г. были произведены известные опыты Сен-Венана и Вантцеля над истечением газов и паров.[3] Хотя в то время взгляды Сен-Венана и Вантцеля и не нашли общего признания (они вызвали, как известно, чрезвычайно резкие возражения Понселе[4]), однако, все же они дали известные численные данные относительно скоростей пара при истечении из сосудов.

С другой стороны, к этому же времени появился уже ряд водяных турбин (Фурнейрона, Жонваля и др.) и разработаны были Понселе основы их теории. [5] Эти исследования дали наиболее подготовленным изобретателям основы для правильных соображений о скоростях пара и скорости на окружности турбины. Так, у Делоншана (Delonchant) (1853 г.) находим следующие совершенно правильные идеи о скоростях, которые должны иметь место в паровых турбинах, и о причинах неудачи при попытках конструирования паровых турбин: «пар, как бы ни было мало его давление, имеет чрезвычайно большую скорость при истечении из сосуда, в котором он заключен. Для того чтобы дать хороший коэффициент полезного действия, скорость на окружности колеса, приводимого в движение паром, не должна быть меньше половины скорости пара, и это обстоятельство мешало до сих пор употреблению реактивных колес.



Фиг. 176

Действительно, водяной пар при 5 атмосферах начального давления вытекает в воздух со скоростью в 500 м в секунду. [6] Колесо, которое этот пар приводит в движение, должно иметь скорость на окружности около 300 м в секунду. Следовательно, если диаметр этого колеса был бы равен 0,95 м, то оно должно было бы делать 6 000 оборотов в минуту и ось

---

[1] K. Sosnowski, цит. соч., стр. 7 и след.

[2] K. Sosnowski, цит. соч., стр. 10 и след.

[3] Journal de l'École Polytéchnique. Cahier 27, стр. 85, 1839, Comptes Rendus, VIII, стр. 294, 1889, XVII, стр. 1845; XXI, стр. 866, 1845.

[4] Comptes Rendus, т. XXI, стр. 178, 366, 387, 1845.

[5] Théorie des effets mécaniques de la turbine Fourneyron. Comptes Rendus, 30 июля 1838 г.

[6] K. Sosnowski, цит. соч., стр. 55 и след. По теперешним данным получается при этих условиях скорость истечения из отверстия около 455 м/сек.

этого колеса при каком угодно диаметре вращалась бы с такой быстротой, которой не могли бы выдержать никакие подшипники, так как они загорелись бы через короткий промежуток времени».

Для преодоления этого затруднения Делоншан предлагает помещать эту ось на окружности двух колес большого диаметра (как в машине Атвуда). Для устранения слишком большой скорости пара в эту эпоху начинают предлагаться также многоступенчатые конструкции. Идея многоступенчатой турбины была высказана Леруа (Leroy) уже в 1840, [1] но с особенной ясностью она сформулирована в предложениях Турнера (Tournaire, 1853 г.),[2] которого можно рассматривать как прямого предшественника Парсонса. В заседании 28 марта 1853 г. Парижской академии наук им была представлена записка о многоступенчатых реактивных паровых турбинах, из которой приводим некоторые наиболее характерные места для оценки понимания автором главных трудностей при создании паровой турбины.

«Упругие жидкости» (т. е. газы и пары) приобретают громадные скорости даже при слабых давлениях. Чтобы надлежащим образом использовать эти скорости на простых колесах, аналогичных водяным турбинам, нужно было бы допустить чрезвычайно большие скорости вращения и сделать очень малыми площади для прохода даже большого количества пара. Можно избегнуть этих трудностей, заставляя газ или пар терять свое давление или постепенно, или сразу отдельными частями и действовать несколько раз на лопатки паровых турбин, соответствующим образом размещенные.

Если разность давлений велика (как это имеет место в паровой машине), то станет ясно, что нужно иметь большое число турбин для достаточного уменьшения скорости рабочей жидкости. Легкость и небольшие размеры движущихся частей позволяют, притом, допускать скорости вращения, значительно большие по сравнению со скоростями обыкновенных машин».

Для осуществления этих идей Турнер предлагает следующую конструкцию своей турбины (фиг. 177).

Турбина эта состоит из нескольких осей, вращающихся независимо друг от друга и действующих посредством зубчатых передач на одно и то же колесо, передающее работу. На каждую из осей *OA* насажен ряд колес с лопатками *BB*, *OO*, *EE*. Между каждыми двумя подвижными колесами помещен неподвижный венец (*GG*, *HH*, *II*). Подвод пара к первому колесу делается через направляющие отверстия *KK*. Пар идет, понижая свое давление при переходе от одного направляющего венца и колеса к другому. Пройдя колеса первой оси, пар поступает на колеса второй оси и т. д.

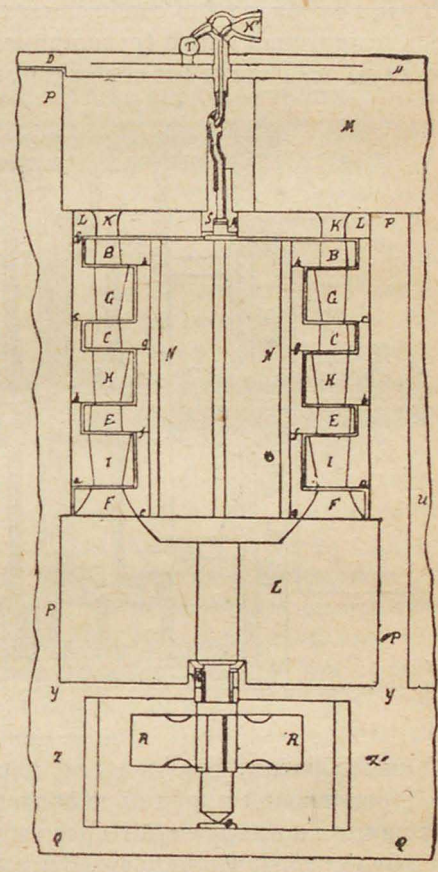
---

[1] K. Sosnowski, цит. соч., стр. 24—25. Заметим, что идея многоступенчатой турбины была высказана в Англии Гилманом в 1837 г. и Вильсоном в 1848 г. (R. Neilson, цит. соч., стр. 27—28 и 35—40).

[2] K. Sosnowski, цит. соч., стр. 51 и след.

Не входя в описание прочих деталей этой турбины, упомянем только, что Турнер указывает на необходимость в зубчатом зацеплении применять геликоидальные зубцы, как дающие более плавную передачу. В этом отношении он предвосхищает зубчатую передачу турбин Лаваля.

Наряду с вышеупомянутыми паровыми турбинами предлагались и другие конструкции, [1] например, радиальная турбина Жирара (Girard, 1855 г.), напоминающая позднейшую турбину Эйермана (1855 г.), турбина с многократным подводом пара Перриго (Perrigot) и Фарко (Farcot, 1864 г.), очень похожая на турбину «Электра». Очень напоминает позднейшие турбины Рато турбина Эдвардса (Edwards, 1871 г.), представляющая собой осевую турбину со ступенями давления (фиг. 178).



Фиг. 177

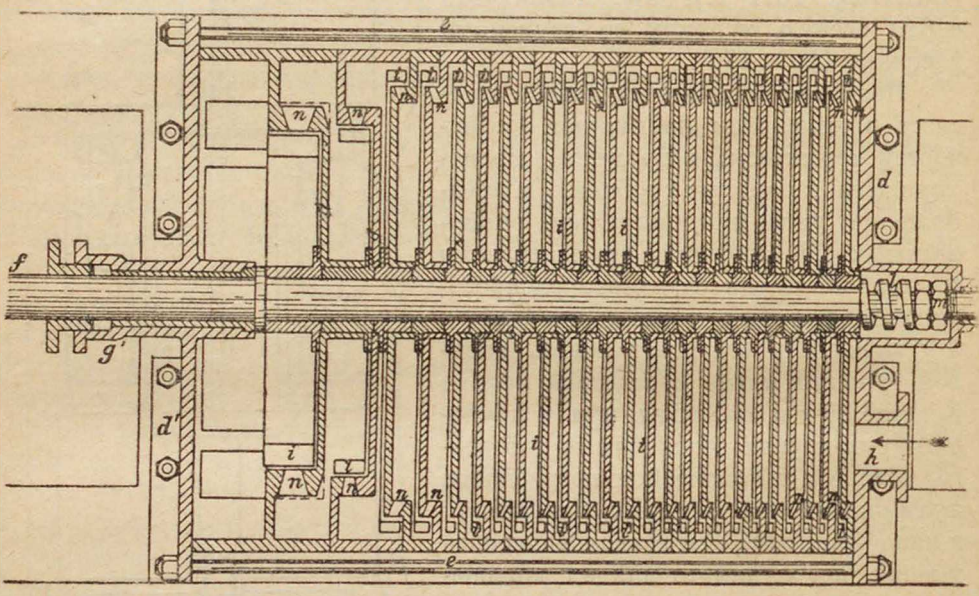
Несмотря на значительный прогресс в отношении понимания особенностей термического процесса, происходящего в паровых турбинах, и предложение ряда принципиально рациональных конструкций, осуществления и сколько-нибудь заметного распространения паровых турбин не было в эту эпоху. Проведение в жизнь паровой турбины могло состояться только в конце 80-х и 90-е годы, при исполнении двух других необходимых для этого условий: выявившейся потребности промышленности в таких двигателях и надлежащей высоты технологического уменья, необходимого для их хорошего выполнения.

Есть, правда, некоторые указания о турбинах, выполненных в более раннее время. Так, в Англии были выполнены в 50-х и 60-х годах некоторые небольшие турбины Шиле (Christian Schiele) [2] мощностью от 1 до 64 л. с., предназначавшиеся для судов, но фактически применявшиеся для вентиляторов, центробежных насосов и круглых пил (т. е. машин, имеющих большую скорость вращения). Однако они не имели длительного успеха, да и не могли его иметь, так как производство их носило очень несовершенный, кустарный характер.

[1] K. Sosnowski. цит. соч., стр. 57 и след., стр. 66 и след., стр. 77 и след.

[2] Матчосс, цит. соч., т. II, стр. 609—610. У Нельсона (Neilson, цит. соч., стр. 39) имеются тоже указания на некоторые турбины, выполнявшиеся в Англии в середине XIX столетия.

Имеются также краткие сведения о производстве паровых турбин в Соединенных Штатах в 30-х годах прошлого столетия. [1] Согласно этим сведениям, несколько паровых турбин было сделано в г. Сиракузах (штат Нью-Йорк) в 1833 г.; они применялись (так же, как и турбины Шиле) для приведения в движение круглых лесопильных пил. Один из заказчиков такой турбины из г. Цицерона (штат Нью-Йорк) сообщает, что такая турбина приводила в движение его лесопильню в 1835 г., причем тратила только $^2/_3$ топлива, которое тратила бы обыкновенная паровая машина. В этих турбинах (по сообщению того же источника) пар подводился через ось и протекал далее (расширяясь) через горизонтальную трубу, направленную по радиусу и снабженную с каждой стороны боковым загибом.



Фиг. 178

Таким образом, турбина эта является простейшим типом одноступенчатой реактивной турбины и совпадала по принципу с устройством одной из ранних конструкций Парсонса (тип «Герон», «Него», 1893 г.), о которой мы будем говорить дальше. Эти американские паровые турбины, во всяком случае, не получили никакого распространения, и техническое значение их было ничтожно. У Ренкина имеется указание, [2] что паровая турбина по патенту Вильяма Гормана (William Gormann) была исполнена для лесопильни в Глазго и дала при работе результаты, не уступающие паровой машине. Но о работе этой турбины нет указаний ни в каких других источниках. У Нельсона приведен только номер патента Гормана, но даже нет его описания (патент № 3267, 1869 г.).

[1] F. Hodgkinson. An Historical Review of Steam Turbine Progress. Westinghouse Electr. Intern. C-ie, стр. 3, 1921.

[2] W. M. Rankine. The Steam Engine, §§ 390—391.

Турбина Лаваля

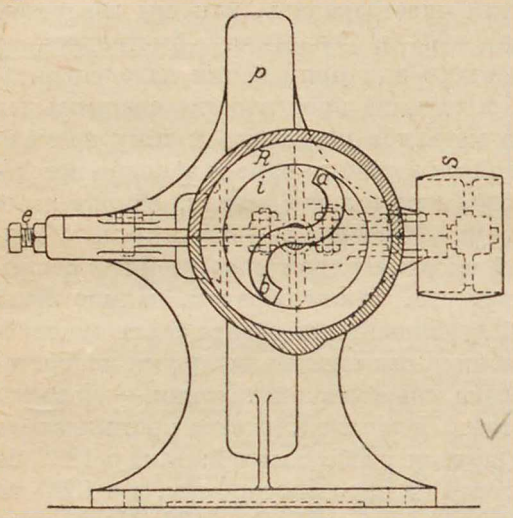
В 80-х годах прошлого столетия чувствовалась, как мы говорили, острая экономическая необходимость в создании быстроходного двигателя, специально предназначенного для применения на электрических станциях. С другой стороны, и техника производства специальных сплавов и механическая обработка металлов поднялись к тому времени на достаточную высоту. Изучение свойств водяного пара и законов истечения пара к тому времени приобрело, как мы указывали, законченный характер (у Цейнера — в Германии, Коттериля — в Англии, Пибоди — в Америке и др.). На большой высоте стояло также учение о сопротивлении материалов и теория упругости. Таким образом, налицо были все условия для создания паровой турбины, и эта задача была одновременно решена (хотя совершенно различными способами) двумя изобретателями, стоявшими вполне на уровне современной техники — Лавалем и Парсонсом. Одновременно с работами Лаваля и Парсонса продолжалась также крайне интенсивная работа других изобретателей: так, с 1880 по 1890 г. было взято в Англии 52 патента на паровые турбины, а с 1890 по 1900 г. (когда уже наметился успех паровых турбин) — 186. Часть этих патентов описана в книге Сосновского; большинство из них не получило значения в дальнейшем развитии турбостроения, и только о некоторых придется упомянуть дальше, так как в них высказаны идеи, нашедшие свое осуществление в позднейших конструкциях.

Лаваль [1] (полное имя: Карл-Густав-Патрик де Лаваль) происходил из старинной французской семьи, эмигрировавшей в Швецию в конце XVII в., во время преследований гугенотов. Он родился в 1845 г. в Далекарлии и получил хорошее образование, сначала в технологическом институте в Упсале, а затем в университете в Упсале, который он окончил в 1872 г. Затем он работал в качестве инженера по химической технологии и металлургии, но вскоре занялся разработкой конструкции сепаратора для молока, который ему и удалось создать около 1878 г.; этот сепаратор получил большое распространение и дал Лавалю средства для занятия его вторым изобретением — паровой турбиной (мы не касаемся других предложений и изобретений Лаваля). Толчок к занятию этим изобретением ему дал именно его сепаратор, нуждавшийся в двигателе с большим числом оборотов (6000—7000 оборотов в минуту). Чтобы избежать всяких передач к оси сепаратора, он предложил в 1883 г. помещать

[1] Биографические сведения о Лавале имеются в статьях: проф. Н. А. Быков, Карл-Густав-Патрик де Лаваль. Вестн. общ. технологов, стр. 447, 1913. — Проф. И. М. Ганицкий, К. Г. П. де Лаваль как конструктор и изобретатель. Вестн. общ. технологов, стр. 447, 1913.

Кроме этих статей сведения о турбинах Лаваля и их развитии имеются в книге Сосновского (цит. соч., стр. 92—93, 150—185), у Стодола (A. Stodola, Dampf und Gasturbinen, 5-te Aufl., Berlin, 1924) и во всех курсах паровых турбин. Надо заметить, что предложение расширяющегося сопла было сделано еще в 1848 г. Ван-Ратеном (Van Rathen — англ. патент № 11 800). R. Neilson, цит. соч., стр. 33—35, стр. 35—318.

прямо на оси последнего реактивную турбину простейшего и много раз предлагавшегося типа, именно — в виде сегнерова колеса (фиг. 179 а и б).

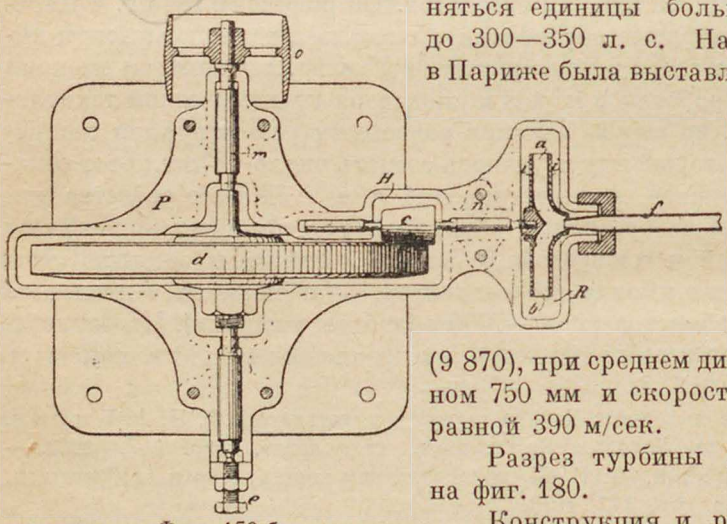


Фиг. 179 а

На эту конструкцию взят был английский патент (№ 1622, 2 апреля 1883 г.). Но затем Лаваль очень быстро перешел к разработке своего собственного типа одноступенчатой активной осевой турбины. Уже в 1889 г. он берет патент на расширяющееся сопло (носящее его имя), позволяющее понизить давление пара ниже критического и повысить скорость его движения до величины, большей скорости звука (английский патент № 7143, 29 апреля 1889 г.).

Вскоре после этого Лавалю удалось преодолеть и другие трудности в осуществлении своей турбины: создать гибкий вал, а затем и диск равного сопротивления; он выработал также окончательную систему закрепления лопаток (каждая из них должна быть отдельно фрезерована).

На выставке 1893 г. в Чикаго представлены были небольшие турбины Лаваля (5 л. с.), делавшие 30 000 оборотов в минуту, а затем стали исполняться единицы больших мощностей — до 300—350 л. с. На выставке 1900 г. в Париже была выставлена турбина Лаваля в 350 л. с., самая большая из однодисковых турбин Лаваля. Она была построена в 500 л.с., с числом оборотов около 10 000 (9 870), при среднем диаметре колеса, равном 750 мм и скорости на окружности, равной 390 м/сек.



Фиг. 179 б

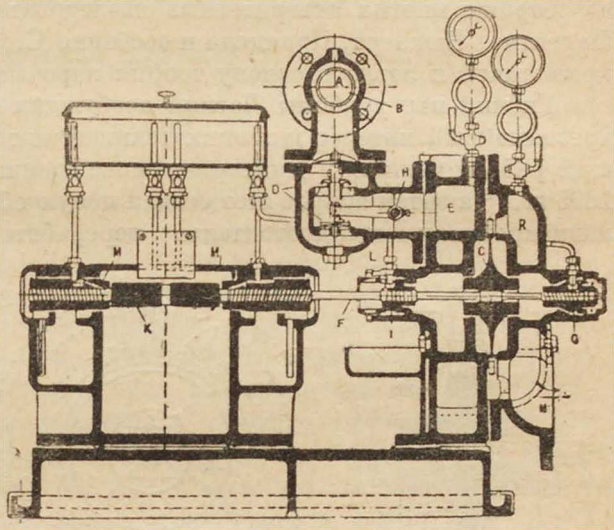
Разрез турбины Лаваля изображен на фиг. 180.

Конструкция и расположение деталей изображены на фиг. 181.

На этом рисунке ясно видно, какое крупное значение имеет в турбине Лаваля зубчатая передача: большое колесо этой передачи значительно больше самого колеса турбины. Необходимость применения таких

зубчатых передач была одной из причин, помешавших постройке турбин Лаваля для больших мощностей.

Лопатки турбин Лаваля и способ их закрепления в диске изображены на фиг. 182. Турбина Лаваля подвергалась много раз испытаниям для определения расхода пара. Одно из самых подробных испытаний сделано Делапортом(Delaporte) в 1902 г.[1] Испытанная им турбина Лаваля в 200 л. с. дала расход в 6,9 кг л. с. ч., причем она работала при следующих параметрах: начальное давление 10,72 ата, противодавление 0,166 ата, пар насыщенный; точная эффективная мощность 197 л. с.



Фиг. 180

Турбины Лаваля сыграли большую роль в истории турбостроения, так как при их конструировании были поставлены и разрешены многие основные вопросы турбостроения вообще:

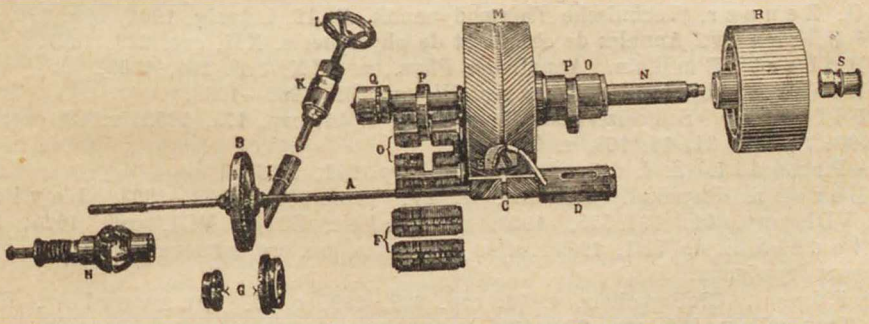
а) работа пара в расширяющемся сопле;

б) проблема гибкого вала;

в) диск равного сопротивления;

г) шаровые подшипники;

д) «разрушитель вакуума» при слишком больших скоростях турбины;



Фиг. 181

е) применение специальных материалов (никелевая сталь для дисков и лопаток);

ж) зубчатая передача.

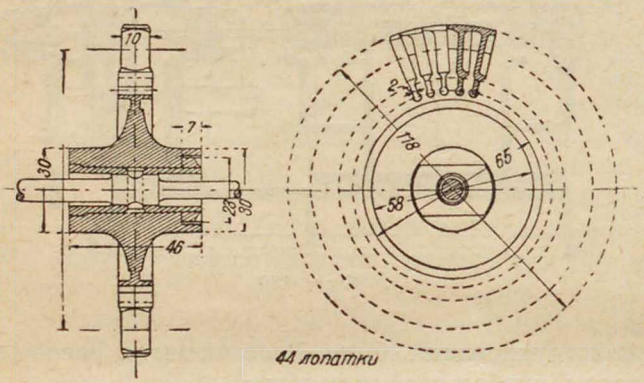
[1] Delaporte, Rev. de mécanique, т. X, стр. 466, 1902.

Особенное значение получили в технической литературе вопросы о расширяющемся сопле Лаваля, о гибкой оси его турбин и о форме дисков.

Первые печатные сведения о турбине Лаваля появились в 1892 г., [1] а затем появляются вышеупомянутые теоретические исследования.

Теория расширяющегося сопла дана была Цейнером в 1899 г. [2] Однако она не получила общего признания, а, напротив того, вызвала возражения со стороны многих авторитетных исследователей. [3] Только после работ Лорентца, Бюхнера, Прандтля и особенно Стодола [4] она сделалась общепризнанной и легла в основу теории паровых турбин.

Гибкий вал турбины Лаваля возбуждал с самого своего появления чрезвычайный интерес широких технических кругов. Первые теоретические работы Феппля и Дунверлея, посвященные ему, появились в 1894—1895 гг., [5] а затем вопрос этот создал целую обширную литературу, систематизированную и самостоятельно переработанную Стодола. [6] Эти исследования повели к созданию методов расчета турбинных валов, которые полностью применяются и в настоящее время.



Фиг. 182

Общая теория прочности быстро вращающегося диска была установлена Грюблером. [7] Она привела к разработке целого ряда методов расчета турбинных дисков (также развитых и систематизированных Стодола [8]) и составляет в настоящее время одну из главных областей конструктивной теории паровой турбины.

[1] Engineer, т. XXVIII, 1892.

[2] G. Zeuner. Vorlesungen über Theorie der Turbinen, стр. 267.
G. Zeuner. Technische Thermodynamik, B. II, Leipzig, 1901, стр. 170.

[3] Parenty. Annales de chimie et de physique, т. XII, стр. 289, 1897.
Robert Emden. Annal. der Phys., т. XIX, стр. 264, 1903.
Blaess. Physikal. Zeitschr., т. IV, стр. 82, 1902—1903.
Fliegner. Schweizerische Bauzeitung, т. 41, стр. 175, 1903; т. 43, стр. 104 140, 1904 г.; стр. 31, 41, 103, т. 48, 1906.

[4] Prandtl. Z. f. d. gesamte Turb., стр. 241, 1906.
Lorenz. Physikal. Zeitschr., т. IV, стр. 333, 1902—1903. Levicki. Z. d. VDI, стр. 441, 491, 525, 1903. Büchler, Z. d. VDI, стр. 1024, 1904. A. Stodola. Z. d. VDI, 1903 г. и во всех изданиях его вышецитированной книги о паровых турбинах.

[5] Föppl, Civiligenieur, т. 41, стр. 633, 1895 г. J. Dunverley, Philosoph. Transact., т. 185, стр. 279, 1894.

[6] A. Stodola, цит соч. во всех изданиях. В последнем (1925 г.) издании — §§ 88—95.

[7] Grübler, Z. d. VDI, стр. 860, 1897 г., стр. 1294, 1899 г.

[8] A. Stodola, цит. соч., §§ 74—82.

Хотя турбина Лаваля оказалась вполне работоспособной, возбудила к себе большой интерес и частностями своей конструкции чрезвычайно способствовала дальнейшему развитию турбостроения, однако, сама по себе она не оказалась способной к дальнейшему развитию и не получила крупного значения в промышленности. Решительный сдвиг в деле применения паровых турбин на центральных электрических станциях произвела турбина Парсонса, к истории которой мы и переходим.

Турбина Парсонса

Создателем второго типа — реактивной турбины — является англичанин Чарльз Альджернон Парсонс [1] (1854—1931 гг.). Он был сыном лорда Росса и получил сначала прекрасное домашнее образование, а затем учился короткое время в дублинском университете; законченное же физико-математическое образование получил в Кембридже (1873—1876 гг.).

По окончании там курса он избрал своей деятельностью машиностроение и поступил для подготовки к работе в этой области на завод Армстронга в Ньюкэстле, где занялся, между прочим, созданием особого типа парового ротативного двигателя, который был построен на заводе Армстронга, а также на заводе Китсона в Лидсе, куда позже перешел Парсонс (1881—1883 гг.). В эти же годы он начал свои занятия вопросом о паровой турбине.

В 1883 г. Парсонс вступает в качестве совладельца в фирму Кларк и Чапман в Гостгиде на Тайне, а с 1889 г. основывает свой собственный турбостроительный и динамостроительный завод в Гитоне на Тайне (Heaton on Tyne), [2] на котором и продолжает работать до самой своей смерти.

Первая паровая турбина была построена Парсонсом в 1884—1885 гг. на заводе Кларк, Чапман, Парсонс и К° в Гостгиде. Соответствующий английский патент был взят 23 апреля 1884 г. (№№ 6734 и 6735). Разрез этой турбины показан на фиг. 183.

Как видно из чертежа, турбина эта осевая, многоступенчатая, с двойным протоком пара (т. е. пар поступает по середине и идет к обоим концам турбины). Эта конструкция принята для уравновешения осевого давления.

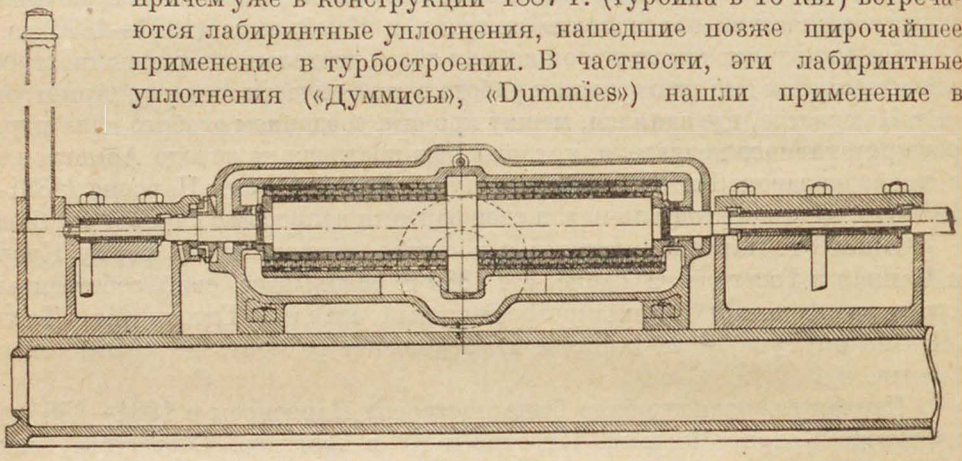
[1] Некрологи Парсонса были помещены во всех важнейших технических журналах, например, в журнале Engineering «The late Hon. Sir C. A. Parsons», в феврале 1931; в Z. d. VDI, № 14, 1931.

Исчерпывающие по полноте сведения о создании и постепенном довоенном развитии турбин Парсонса имеются в книге A. Richardson «The Evolution of the Parsons steam turbine», London, 1911 г. Из этой книги заимствованы главные данные о развитии турбин Парсонса для настоящего очерка. Подробная биография Парсонса дана в книге «Charles Parsons» by Rollo Appleyard, London, 1933 г. Сведения о развитии турбин Парсонса, приведенные в книге Ричардсона, дополняются в обширных статьях, помещенных в 1-м полугодии 1934 и 1935 г. в журнале «The Engineer». История развития турбин Парсонса доведена в них до самого новейшего времени.

[2] Впоследствии этот завод развился и стал собственностью особого акционерного общества, имеющего тоже специальный завод для постройки судовых паровых турбин в Вальсенде (Wallsend).

Расширение пара происходит как в неподвижных, так и в подвижных лопатках, т. е. турбина работает по реактивному принципу, принятому в позднейших турбинах Парсонса. Первая построенная турбина имела мощность (электрическую), равную только 6 л. с. и была подвергнута многочисленным испытаниям для выяснения необходимых изменений в конструкции деталей. Последующие годы (1885—1888) были употреблены на дальнейшую разработку этого типа, нашедшего уже некоторые практические применения (турбина для приведения в движение динамомашины при 1000 оборотах в минуту на корабле «Earl Percy»).

Особенные затруднения представляла выработка рациональной конструкции лопаток и способов их укрепления, а также — уплотнений, причем уже в конструкции 1887 г. (турбина в 16 квт) встречаются лабиринтные уплотнения, нашедшие позже широчайшее применение в турбостроении. В частности, эти лабиринтные уплотнения («Думмисы», «Dummies») нашли применение в



Фиг. 183

уравновешивающих осевые давления разгрузочных поршнях, предложенных Парсонсом в 1888 г. и позволивших перейти к конструкции турбин с одним протоком пара. Усовершенствования, постепенно вводимые в эти мелкие турбины, понизили первоначальный расход в 44 кг на киловатт-час до 12,8 кг/квт-час для турбины в 32 квт., работавшей насыщенным паром без конденсации при начальном давлении в 7 кг/см². [1] Некоторые из этих усовершенствованных турбин достигали мощностей в 60—75 квт при числе оборотов в минуту, равном 5000—4800. Такие турбины применялись для электрического освещения и общее число построенных до 1889 г. турбин доходит до 300. К этому времени Парсонс создал также проект двухцилиндровой турбины (с отдельными частями высокого и низкого давления), который, однако же, не был осуществлен в это время, так как между компаньонами завода в Гостгиде и Парсонсом произошли недоразумения, повлекшие за собой выход Парсонса из Компании, причем за последней оставалось исключительное право постройки каких бы то ни было аксиальных турбин.

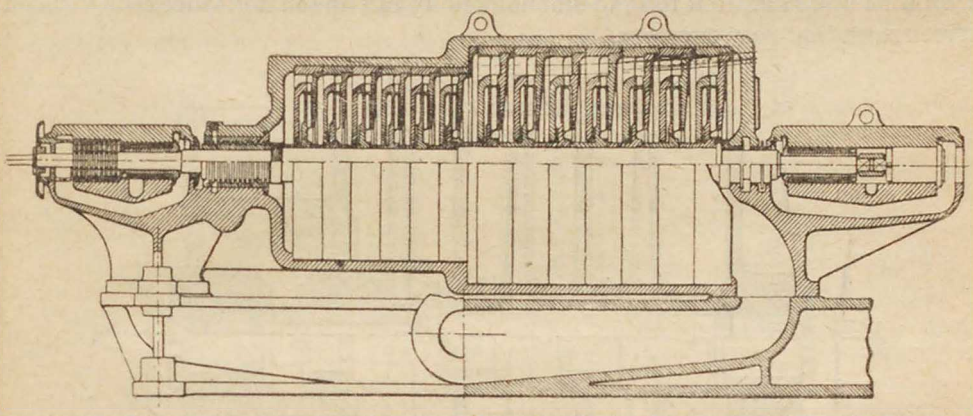
[1] Engineering, т. 46, стр. 478.

Это обстоятельство заставило Парсонса оставить на долгое время область (уже значительно подвинувшуюся в конструктивном выполнении) аксиальных турбин и перейти к созданию типа радиальных многоступенчатых турбин. [1]

Первая такая турбина, названная «Джумбо», была построена на заводе Парсонса в Гитоне, мощностью в 32 квт при 6000 оборотах в минуту.

Разрез этой турбины изображен на фиг. 184.

Тип этот подвергался многочисленным изменениям и конструктивным усовершенствованиям. Конструкции с чередующимися неподвижными дисками и подвижными колесами представляют в общем сходство с позднейшими конструкциями турбин Рато и Целли.



Фиг. 184

Число оборотов в этих турбинах было уменьшено до 2 000 в минуту. Одна из усовершенствованных турбин этого типа в 100 квт была испытана проф. Юингом в 1891 г. [2]

Работая насыщенным паром, при давлении в 6,5 ата и давлении конденсатора, равном приблизительно 0,07 ата и при полной нагрузке, турбина давала расход пара, равный около 17 кг на квт-час.

Турбина аналогичной конструкции, испытанная Кеннеди в 1893 г., [3] дала при работе со слабо перегретым паром (на 38°) и давлении выпуска, равном 7,2 ата, еще более благоприятные результаты, именно расход, равный 12,7 кг на квт-ч.

Несмотря на эти благоприятные результаты, Парсонс продолжал предлагать и испытывать новые конструкции. В 1893 г. он создал самый простой тип многоступенчатой турбины, представляющей соединение нескольких простых реактивных колес — тип «Герон» (фиг. 185).

---

[1] Английский патент № 1120, 1890 г.

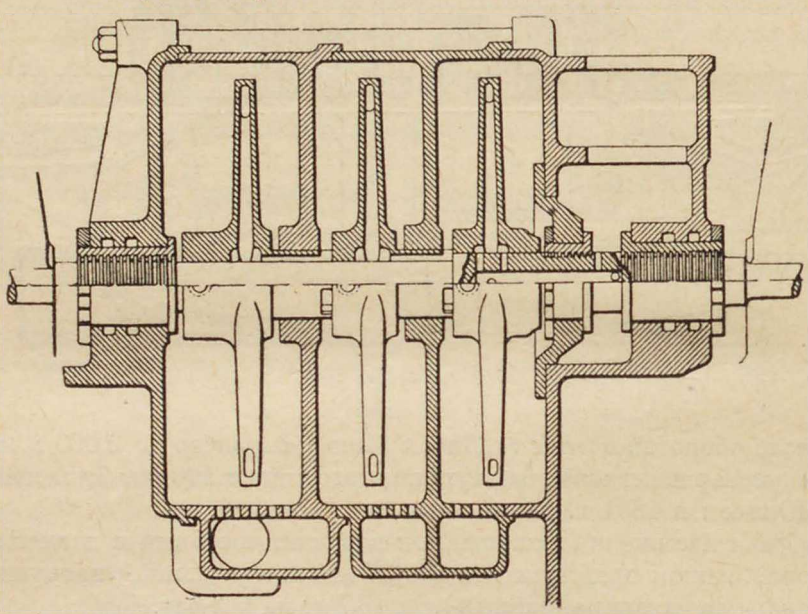
[2] Ewing, Engineering, т. 53, стр. 52. Чертежи этой турбины приведены также в книге Юинга. Русский перевод: Юинг. «Паровая турбина». Киев, 1904 г., § 239.

[3] Kennedy, Engineering, т. 56, стр. 126. Результаты этих опытов приведены выше в цит. русском переводе книги Юинга, § 239.

Эти колеса иногда комбинировались еще с радиальным колесом дискового типа (фиг. 186).

Однако, 5-летний опыт конструкции радиальных турбин (1889—1894 гг.) привел Парсонса к убеждению в их меньшей выгодности по сравнению с аксиальными: самые лучшие радиальные турбины давали все же расход пара, больший процентов на 12, чем аксиальные турбины, тип же «Герон» давал коэффициент полезного действия, равный только 70% коэффициента осевой турбины.

Эти обстоятельства побудили Парсонса вернуться к типу осевой турбины в 1894 г., как только он вновь получил право пользоваться своими патентами на эту систему.



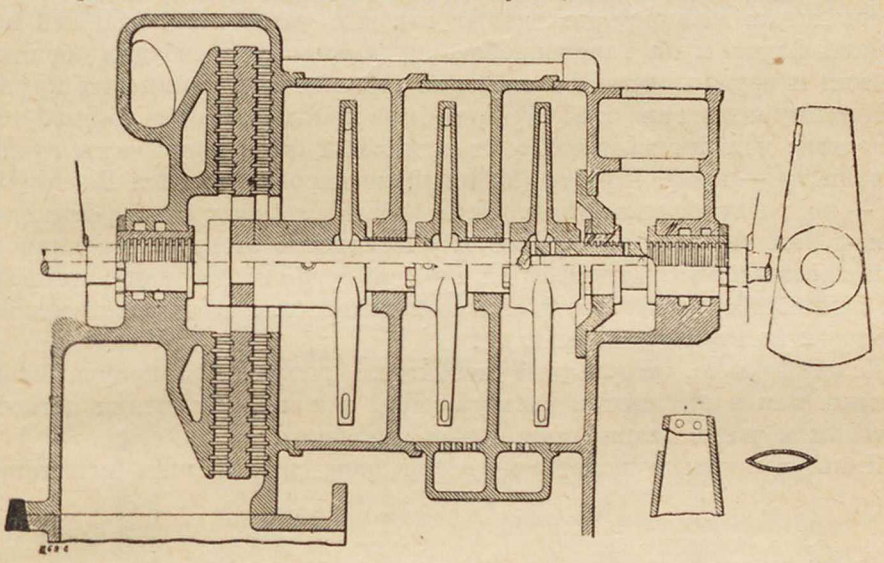
Фиг. 185

Одна из первых осевых реактивных турбин, построенных в это время на заводе Парсонса в Гитоне, была турбина для Общества лондонского метрополитэна в 350 квт, работавшая без конденсации при 3000 оборотах в минуту и дававшая расход, равный 19,5 кг на квт-час при полной нагрузке.

В дальнейшем Парсонс предпринял новую большую работу по усовершенствованию деталей этой турбины. Прежде всего, внимание его было обращено на рациональную конструкцию лопаток. Вместо того, чтобы размещать их на отдельных кольцах (как было сделано в старом типе аксиальной турбины Джумбо, изображенном на фиг. 184) и потом вырезать из целого металла кольца, Парсонс перешел к лопаткам, изготовляемым отдельно, соединяемым в секторе, закрепляемым в прорезах на барабанах при помощи промежуточных вставок и скрепляемых на конце проволокой. Этот тип лопаток принят и в настоящее время во всех

системах паровых турбин, с различием только в материале и в деталях закрепления лопаток на барабанах или дисках. Парсонс пробовал разные материалы для лопаток (дельта-металл и др.), но остановился окончательно (с 1896 г.) на бронзе для пара насыщенного и умеренно перегретого, чистой меди для части высокого давления и на никелевой бронзе для пара высокого перегретого (20% никеля и 80% меди).

Другая деталь, которая подверглась тоже большим изменениям, была регулятор. Уже в 1890 г. Парсонс предложил тип регулирования с прерывным впуском, при помощи электрической передачи к впускному клапану (английский патент № 1120, 1890 г.). Но электрическая передача оказалась для этой цели неудобной и в том же году Парсонс предложил передачу посредством сжатого воздуха (английский патент № 11083,



Фиг. 186

1890 г.). В 1891 г. Парсонс вновь вернулся к электрической передаче (английский патент № 10940, 1891 г.). Но и это не было окончательным решением, и в конструкции 1892 г. самое перемещение дроссельного клапана дается давлением пара на поршенек, связанный с дроссель-клапаном, а электрическое воздействие оставлено только для изменения точки колебания рычага, действующего на поршенек. В позднейших конструкциях (100 квт турбина в Вульвиче, 1896 г.) и эта электрическая часть была заменена обыкновенным механическим регулятором.

После этого ставились иногда еще одновременно электрическая и механическая системы (Эльберфельдские турбины, 1899 г.), но затем электрическая часть была вовсе оставлена. Таким образом, главным отличием системы Парсонса от других остается прерывистый (больший и меньший) впуск пара, связанный с движением регулирующих органов вверх и вниз, что уменьшает трение и придает регулированию большую чувствительность.

Нормальным типом турбин Парсонса в этом периоде (как и в позднейшее время) являются турбины с одним протоком пара и с уравновешивающими поршнями.

Введенные Парсонсом в этом периоде усовершенствования сильно снизили расход пара. Так, в опыте с турбиной в 400 квт, произведенном в 1896 г., получился уже расход в 9,2 кг на квт-ч. [1]

Достижения в области турбостроения, выяснившиеся к середине 90-х годов, вызвали в Англии большой интерес к паровым турбинам; так, в одном 1896 г. поставлено в Англии паровых турбин на 40 000 л. с. На континенте же Европы турбины не находили распространения. Положение это изменилось в 1899 г., когда по инициативе инж. Линдлея (бывшего тогда главным инженером города Франкфурта) для электрической станции в городе Эльберфельде было заказано 2 турбины Парсонса по 1000 квт. При высоком уровне постройки паровых машин, достигнутом на германских машиностроительных заводах, заказ этот, сданный иностранной фирме и на малоиспробованную машину, возбудил большие сомнения и неудовольствие в широких германских технических кругах.

Поэтому испытание этой турбины было произведено с особенной тщательностью: для производства этих испытаний были привлечены лучшие специалисты — проф. Шретер (Мюнхен) по паровой части и Вебер (Цюрих) — по электротехнической. Отчет об испытаниях Эльберфельдской турбины был опубликован в 1900 г. [2] Появление этого отчета является одной из важнейших дат в истории паровой турбины, так как с этого времени начинается ее быстрое развитие и вытеснение ею паровой машины из области электрических станций.

Действительно, результаты испытания получились крайне благоприятные как в отношении расхода пара, так и в отношении легкости установки и эксплоатационных свойств турбины.

Приводим только некоторые главнейшие данные этих испытаний.

Таблица 8

Нагрузка (квт)	Среднее давление впуска (кг/см² абс.)	Температура пара при впуске °С	Величина перегрева °С	Противодавлен. (кг/см² абс.)	Расход пара кг/квт²-час
1 190,1	10,11	189,5	10,2	0,063	8,81
994,8	10,47	192,0	11,1	0,053	9,14
745,3	10,76	190,0	8,0	0,054	10,12
498,7	10,40	209,7	29,1	0,046	11,42
246,5	10,14	196,4	17,0	0,05	15,31

[1] Engineering, стр. 495, 2 полов. 1896.

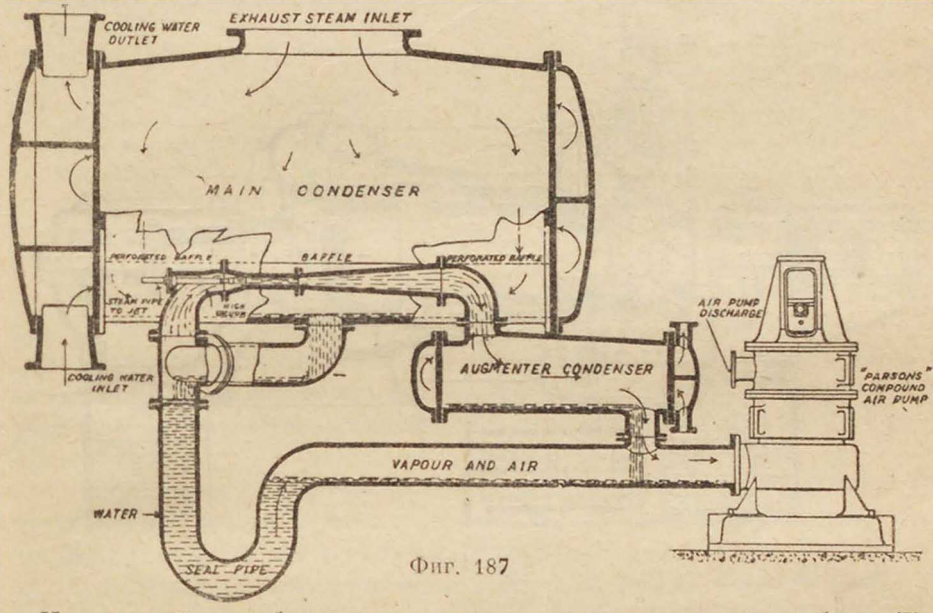
[2] Z. d. VDI, стр. 829, 1900. Отчет этот был перепечатан и в других крупных технических журналах, например, Revue de mécanique, стр. 603, 2-е полугодие 1900 г.

Разность числа оборотов при работе вхолостую и при нормальной нагрузке не превосходила 3,6%. При внезапной разгрузке повышение числа оборотов не превосходило 10% (при действии центробежного регулятора).

Эти испытания можно считать завершением периода создания турбины Парсонса. В дальнейшем (до самого новейшего времени) тип ее мало менялся, увеличивалась только постепенно мощность и вносились отдельные усовершенствования.

Так, например, уже в 1913 г. испытывалась турбина в 25 000 квт, давшая следующие результаты:

Давление пара при впуске	14 атм.
Перегрев	110°
(т. е. температура при впуске	304°)
Гарантированный расход пара при такой нагрузке	5,3 кг на квт-час
Истинный расход	5,0 » » »



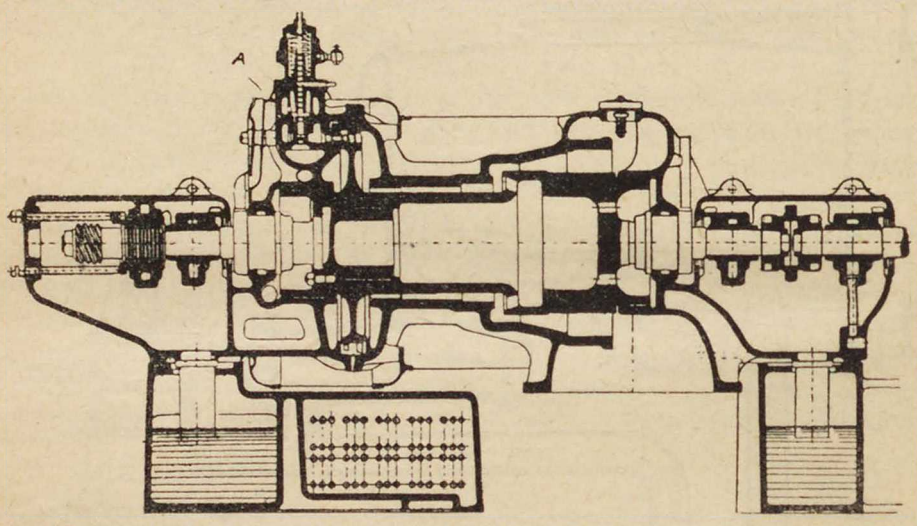
Фиг. 187

Из позднейших, более крупных усовершенствований турбины Парсонса следует упомянуть об увеличителе вакуума, предложенном им в 1903 г. (английский патент № 840, 1903 г.). Часть воздуха отсасывается и сжимается при этом при помощи струйного аппарата, работающего при действии вдуваемого через сопло свежего пара. Для отделения этого пара от получаемой смеси, последняя пропускается затем через вспомогательный конденсатор и затем уже поступает в мокро-воздушный насос (фиг. 187).

Эта конструкция является первым примером «струйных элементов» в конденсационных установках паровых турбин, нашедших самое широкое применение в настоящее время в виде пароструйных эжекторов, вытесняющих все другие аппараты для отсасывания воздуха.

Незадолго до опубликования результатов испытания Эльберфельдской турбины, одна из лучших электротехнических фирм, именно фирма Броун-Бовери в Бадене (возле Цюриха), приобрела право производства турбин Парсонса; образовано было «Акционерное общество для паровых турбин системы Броун-Бовери-Парсонс», причем кроме завода в Бадене основан был для производства паровых турбин второй завод в Маннгейме. Завод Броун-Бовери внес в турбостроение свой богатый опыт по построению электрических генераторов, что дало возможность быстро увеличить мощность производимых единиц. Так, начав выпуск турбин в 1900 г., завод Броун-Бовери имел к 25 октября 1903 г. следующее количество выпущенных и заказанных турбин [1] (см. табл. на стр. 331).

В конструкцию, принятую Парсонсом для паровых турбин, завод Броун-Бовери внес много частных усовершенствований (на которых мы



Фиг. 188

не можем останавливаться); нельзя, однако, не остановиться на типе комбинированной активно-реактивной турбины, введенном заводом в 1908 г. и с тех пор примененном почти до настоящего времени. В типе этом, в части высокого давления, ставится колесо Кэртиса с 2 ступенями скорости (фиг. 188).

Введение колеса Кэртиса, хотя и снижает коэффициент полезного действия турбины, но зато уменьшает число ступеней, делает турбину более дешевой и лучше регулируемой. Поэтому применение смешанных конструкций с колесом Кэртиса в верхней части получило большое распространение и только в новейшее время начинают преобладать смешанные же активно-реактивные турбины, в которых активная часть представляет собой чистые ступени давления (без ступеней скорости).

[1] Издание фирмы «Dampfturbinen Brown-Boveri-Parsons», 2-е изд., 1903 г.

Таблица 9

Сроки	Число		Общая мощность установленных паровых турбин (л. с.)	Мощность наибольшей паровой турбины (л. с.)
	Паротурбинных установок	Паровых турбин		
1900 до 1902 г.	31	37	29 810	5 000
января 1903 г. до 20 марта 1903 г.	10	14	12 630	2 250
20 марта 1903 г. до 1 июня 1903 г.	13	19	21 540	8 000
Судов. турбин. для нем. военн. флота	2	6	15 000	—
1 июня 1903 г. до 15 августа 1903 г.	11	13	10 210	3 500
16 августа 1903 г., парижский метрополитен	1	5	24 500	8 000
17 августа 1903 г. до 25 октября 1903 г.	6	—	—	—
Общее число	74	102	113690	—

После принятия системы Парсонса заводом Броун-Бовери целый ряд заводов тоже приобрел право производства этих турбин и начал изготовлять их с теми или иными конструктивными изменениями. К числу этих заводов принадлежит завод Мельмс и Пфеннигер — в Мюнхене, перешедший уже в 1905—1906 гг. к постройке комбинированных турбин с колесом Кэртиса.

Этот же тип комбинированной турбины строил завод Тиссен-Редер, Первый Брюннский машиностроительный завод (который, впрочем, один из первых перешел к постройке смешанных активно-реактивных турбин с несколькими простыми колесами в верхней части), Франко-Този в Леньяно (Италия), Гуте-Гофнунгс-Гютте. [1] Первоначальный же тип Парсонса (без колеса Кэртиса) стал строиться американскими фирмами: Аллис-Чальмерс и Вестингауз. Последняя приобрела лицензию на производство турбин Парсонса очень рано и первую турбину построила уже в 1896 г.[2] В этом же году ею была построена турбина типа Парсонса мощностью в 120 квт при 5 000 оборотах, расходовавшая 11,7 кг на квт-ч., при начальном давлении 11,3 ата и вакууме в 91%. Но настоящие паротурбинные установки фирма начала строить в 1899 г. (3 турбины по 400 квт. для тормозного завода Вестингауза в Вильмердинге). В 1900 г. завод Вестингауза построил первую турбину в 2000 квт при 1 200 оборотах в минуту, с одним цилиндром (Парсонс строил свои турбины такой мощ-

[1] После войны у самого Парсонса турбины мелкой и средней мощности стали строиться с колесами Кэртиса, а иногда даже чисто активными.

[2] F. Hodgkinson, цит. изд., стр. 3 и след.

ности при 2 цилиндрах). Турбина эта возбудила большое внимание в технических кругах того времени и побудила самого Парсонса и завод Броун-Бовери тоже перейти к постройке одноцилиндровых турбин крупных мощностей.

После 1900 г. завод Вестингауза быстро развивает свое турбостроение: так, в 1903—1904 гг. он строит еще турбины по 1000 и 1500 квт, уже в 1905 г. переходит к постройке турбин в 5500—7500 квт, а в 1909 г. строит первые турбины по 10 000 квт. Затем в свои турбины и электрические генераторы завод вносит ряд усовершенствований и переходит во время мировой войны к постройке турбин еще больших мощностей — в 20 000 квт (1915 г.), в 30 000 и 35 000 квт (1917 г.). О послевоенных турбинах этого завода (являющегося одним из главных американских заводов по постройке паровых турбин) мы будем говорить ниже.

Активные многоступенчатые турбины

Другое решение проблемы многоступенчатой турбины принадлежит французскому ученому и инженеру А. Рато и американцу Кэртису.

А. Рато (Augustin Rateau) [1] родился в гор. Руане в 1863 г. и кончил Политехническую школу и Высшую горную школу в Париже.

Еще будучи студентом, он начал свою научно-техническую работу. Уже в 1888 г. он получил профессуру в Высшей горной школе в Сэнт-Этьене, а в 1902 г. в Париже. С 1890 г. появляются его работы по паровым турбинам и «турбомашинам» вообще. В 1900 г. он выступает на Международном конгрессе по прикладной механике в Париже со своим предложением активной многоступенчатой турбины со ступенями давления, которая в это время была уже начата осуществлением на заводе Соттер-Гарле (Sautter-Harlé).

В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже были представлены части и чертежи паровой турбины в 1000 л. с.

В своем докладе Рато дает переработанные им основные формулы для нахождения скорости истечения пара из отверстий и сопел и приводит некоторые данные произведенных им опытов над истечением пара.

Далее дается основная формула для нахождения мощности турбины. Он исследует также некоторые вопросы, которые играли большую роль в дальнейшей теории паровой турбины, например, вопрос о трении колеса турбины о пар, а также некоторые формулы прочности частей паровой турбины.

Затем он проводит в практику некоторые из испробованных им на заводе Соттер-Гарле конструкций паровых турбин, причем как последнюю конструкцию дает именно многоступенчатую паровую турбину со ступенями давления (фиг. 189).

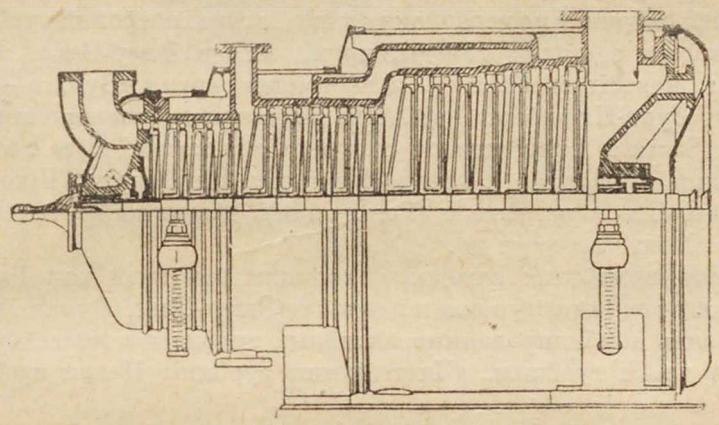
---

[1] Некролог Рато помещен в журнале «Engineering» 17 января 1930 г. Сведения о раннем периоде работ Рато по паровым турбинам имеются в его докладе на конгрессе по прикладной механике — Congrès international de mécanique appliquée, т. III, стр. 91 и след., Paris, 1901.

Большое внимание Рато обращает на рациональную конструкцию диафрагм, разделяющих колеса, которая имеет особенное значение в отношении уменьшения потерь на пропускание пара.

В турбине своей Рато ожидал получить расход пара, не превышающий 5,7 кг л. с. при начальном давлении в 13 ата и противодавлении в 0,10 ата.

Дальнейшая деятельность Рато развивалась в областях, имеющих крупное значение для турбостроения. Так, им создан был в 1902 г. первый тепловой аккумулятор, давший возможность с выгодой применять в предприятиях с переменным расходом пара отходящий пар низкого давления. Эти устройства, предложенные Рато первоначально для металлургических заводов, получили в последнее время большое развитие в виде тепловых



Фиг. 189

аккумуляторов Рутса и других, применяемых вообще в предприятиях с переменным расходом пара. [1]

Важным достижением в технике является также создание Рато турбокомпрессоров, получивших вскоре большое распространение на металлургических заводах и вытеснивших тяжелые старые поршневые воздуходувки. Крупные компрессоры часто приводятся в движение паровыми турбинами; таким образом, распространение турбокомпрессоров расширило область применения паровых турбин.

Рато один из первых применил газы, отходящие из аэропланных двигателей, для приведения в движение небольшой газовой турбины, соединенной с турбокомпрессором. Последний сжимает засасываемый воздух и подает его в сжатом виде в цилиндры двигателя. Эта подзарядка (наддув) особенно необходима на большой высоте, на которой иногда движутся аэропланы (особенно военные): разреженный на таких

[1] Старая литература по тепловому аккумулятору Рато приведена в статье Д. В. Яковлева «Утилизация отработанного пара в турбинах низкого давления» (Вестн. общ. технологов, стр. 275, 1909 г.). Новейшая литература по тепловым аккумуляторам имеется в переводном сочинении В. Пауэр «Аккумулирование энергии», 1930.

высотах воздух при обыкновенном засасывании не может дать нормальной мощности двигателя. [1] Способ подзарядки посредством применения сжатого газовой турбиной воздуха начинает в новейшее время применяться в дизельмоторах и в крупных газовых двигателях (о нем будет сказано дальше). Таким образом, это изобретение Рато получило большое техническое значение. Рато скончался в январе 1930 г.

Возвращаясь к паровым турбинам, надо сказать, что тип, предложенный Рато, получил большое развитие в Швейцарии, Германии и Франции.

Особенное значение в этом движении получило прежде всего конструктивное осуществление активной турбины со ступенями давления, данное инженером завода Эшер-Висс в Цюрихе, Целли (1903 г.). [2]

Положив в основу своей конструкции ту же идею, что и в турбине Рато, Целли внес в нее ряд усовершенствований, прежде всего — сокращение числа ступеней с 16—20 (принятых у Рато) до 10. В скором времени образовался синдикат из нескольких заводов для постройки турбин Целли. Постройкой их занялись заводы, кроме завода Эшер-Висс: Герлицкий («Görlitzer Maschinen Fabrik», в настоящее время «Вумаг» — Wumag), завод Аугсбург-Нюрнберг («MAN»), Эльзасское машиностроительное общество (Société Alsacienne de constructions mécaniques» с заводами в Мюльгаузине и Бельфоре), завод Эрликон в Швейцарии, Шкода (Scoda) в Пильзене, Сторк в Генгело (Голландия), общество постройки турбин Лаваля в Стокгольме [3] и др.

Некоторые из этих заводов сохранили основной тип Рато-Целли, т. е. турбины с одними ступенями давления(Эшер-Висс, Вумаг), другие же стали строить комбинированные активные турбины с колесами Кэртиса в верхней части турбины. «Чистый» тип турбины Целли изображен на фиг. 190.

Это турбина в 8000 л. с. Герлицкого завода.

Нам надо перейти теперь к другому типу многоступенчатых турбин, именно к турбинам со ступенями скорости, созданным американским инженером Кэртисом (C. I. Curtis).

В системе Кэртиса пар приобретает большую скорость, проходя через расширяющееся сопло Лаваля, но затем скорость эта используется не в одном ряде лопаток, как у Лаваля, а в двух или более. Эти ряды лопаток размещаются обыкновенно на одном диске; в промежутках между двумя подвижными рядами лопаток помещается неподвижный ряд лопаток, служащий для изменения направления движения пара. Схема такого устройства, согласно первоначальному патенту Кэртиса (американский патент № 566 969 1896 г.) показана на фиг. 191, где *c* и *d* — подвижные лопатки, *e* — неподвижные.

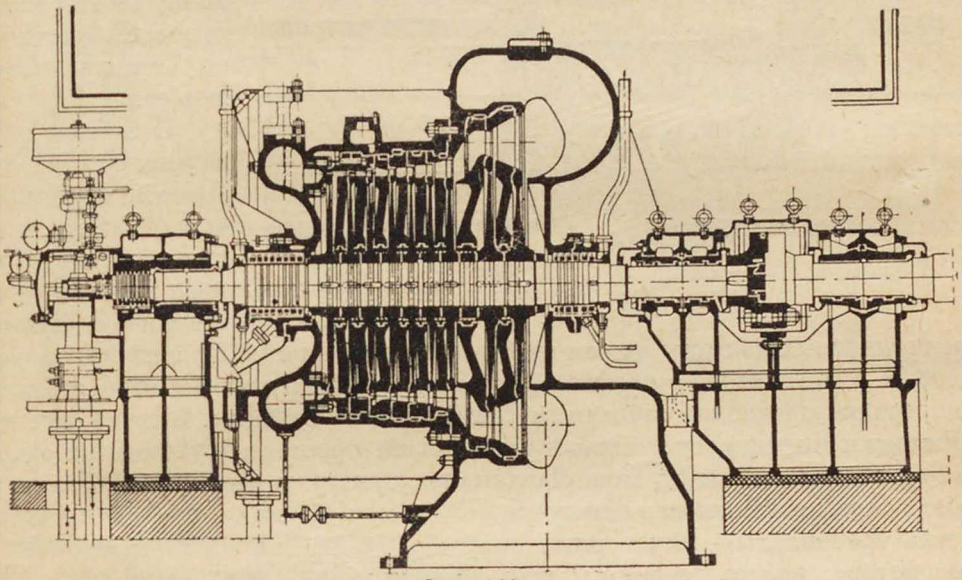
---

[1] Данные об этом способе содержатся в статье самого Рато, написанной перед самой его кончиной; A. Rateau, Gén. Civil. № 7, 1930 г.

[2] A. Stodola, цит. соч., стр. 527.

[3] Первоначально строившее части турбины Лаваля, оно перешло в 1917 г. к постройке многоступенчатых активных турбин.

В неподвижном сопле падение давления могло быть полным или неполным. В первом случае вся турбина состояла из одного подвижного колеса Кэртиса с двумя или более ступенями скорости. Во втором случае — в первом сопле используется только часть теплового перепада, полученная скорость используется в первом колесе Кэртиса, затем пар идет во второе сопло, в котором опять теряет часть своего давления и приобретает скорость, используемую во втором колесе Кэртиса, и т. д.



Фиг. 190

Таким образом возникает турбина со ступенями давления и скорости.

Осуществление турбин по принципу Кэртиса приняла на себя американская компания «Дженераль-Электрик», которая начала строить эти турбины в 1901—1902 гг.

Особенностью этих турбин является применение вертикальной оси. Пример такой конструкции представлен на фиг. 192. Фирма «Дженераль-Электрик» долго держалась этой вертикальной конструкции [1] и только значительно позже перешла к обыкновенной горизонтальной.

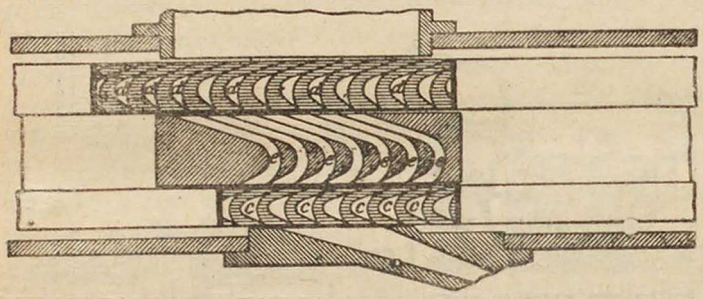
Постройка турбин системы Кэртиса быстро развивается в Америке, и завод «Дженераль-Электрик» делается вскоре одним из ведущих заводов по турбостроению в Соединенных Штатах.

Но система Кэртиса приобрела также крупное значение для Европы вследствие использования ее заводом «Всеобщая компания электричества» в Берлине («Allgemeine-Elektrizitäts-Gesellschaft» — AEG).

Завод этот один из первых в Германии (еще в 1884 г.) по инициативе

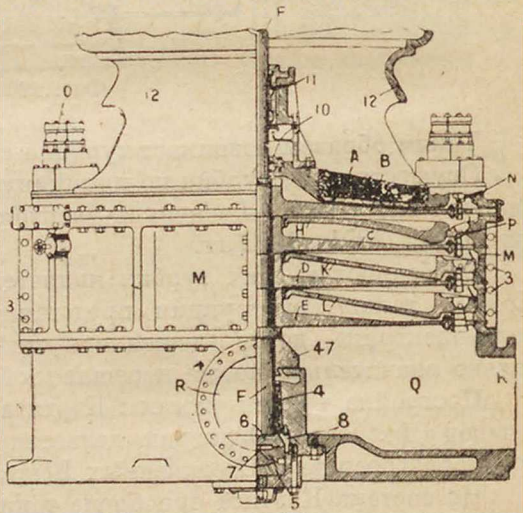
[1] У Стодола приведен пример турбины Дженераль-Электрик для станции Fickstreet в Чикаго, мощностью в 12 тыс. квт с вертикальной осью. A. Stodola, цит. соч., стр. 497.

известного директора «Всеобщей компании электричества», Эмиля Ратенау (Emil Rathenau), занялся изготовлением электрических машин и всей прочей аппаратуры для электрических станций. [1] Для удовлетворения потребности в машинах—двигателях на сооружаемых станциях завод «Всеобщей компании электричества» начал даже постройку собственных паровых машин, но вскоре оставил ее.



Фиг. 191

С появлением паровых турбин «Всеобщая компания электричества» вновь вернулась к мысли о постройке собственных паровых двигателей для сооружаемых станций. Первоначально она вошла в соглашение с профессорами Ридлером и Штумпфом относительно постройки предложенной ими системы паровой турбины. В своей системе Ридлер и Штумпф стремились к наибольшей простоте: турбина их одноступенчатая, как и турбина Лаваля, но диаметр у нее берется большой, что дает возможность получить сравнительно малое число оборотов колеса турбины и обойтись без зубчатой передачи; так, колесо турбины в 2000 квт, построенной заводом «Всеобщая компания электричества» для станции Моабит в Берлине, имело средний диаметр, равный 2000 мм.



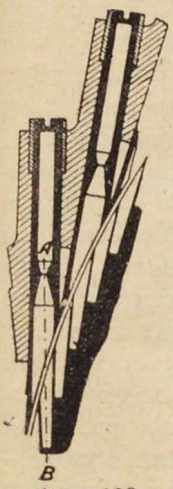
Фиг. 192

Нормальное число оборотов этой турбины было равно 3000, причем получалась скорость на окружности, равная 314 м/сек. Турбина Ридлера-Штумпфа тоже чисто активная, т. е. пар расширяется полностью в соплах, лопатки же вырезаются в самом подвижном колесе и имеют такую форму, как в колесе Пельтона (фиг. 193 а, б).

Сопло лежит в плоскости колеса, и таким образом пар, поступая на колесо, поворачивается на 180°. В другой конструкции этих турбин,

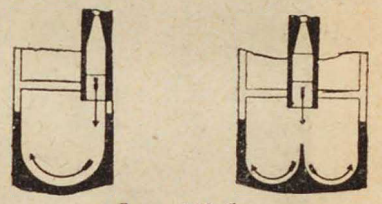
[1] Сведения о развитии паротурбостроения на заводе «Всеобщей компании электричества» помещены в книге, изданной этой фирмой, «25-Jahre AEG-Dampfturbinen», Berlin, 1928.

имеются ступени скорости: пар по выходе из первой подвижной лопатки поступает в поворотное направляющее сопло и вновь поступает на подвижную лопатку (фиг. 194а, б).



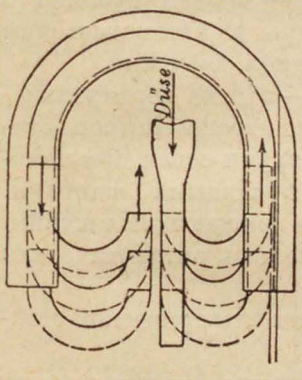
Фиг. 193 а

Турбины эти оказались для больших мощностей практически непригодными. Так, например, одна из таких турбин была поставлена на станции «Электрическая сила» в Баку и в скором времени должна была быть остановлена. [1] Поэтому и вследствие дороговизны изготовления колес с фрезерованными лопатками производство их в Германии было прекращено, но в Америке, по системе, схожей с системой Ридлера, строятся небольшие турбины Терри[2] (завод в Гартфорде, штат Коннектикут).


Фиг. 193 б

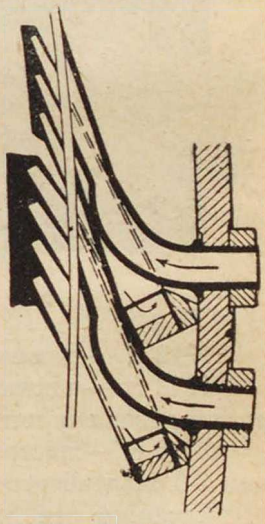
В небольших турбинах, работающих без конденсации, пар расширяется полностью в соплах и проходит через несколько подвижных лопаток (фиг. 195).

Эта конструкция дает возможность работать при сравнительно небольшом числе оборотов и при небольших диаметрах. Такие турбины без конденсации строятся мощностью до 750 квт и применяются для непосредственного соединения с электрическими генераторами, насосами, турбокомпрессорами и т. п. машинами-орудиями.



Фиг. 194 а

Конденсационные турбины Терри заключают, кроме колеса со ступенями скорости, еще несколько колес, простых, активных ступеней давления.


Фиг. 194 б

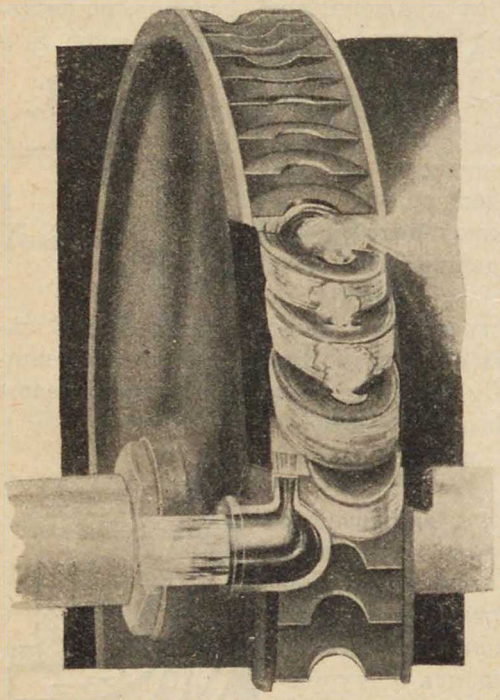
Возвращаясь к турбинам «Всеобщей компании электричества», следует сказать, что специальный завод для производства этих турбин основан был в 1903 г. (на Гуттенштрассе в Берлине, первоначально с 500 рабочими); здесь сначала еще строились турбины Ридлер-Штумпфа, но вскоре «Всеобщая компания электричества» использовала весь опыт «Дженераль-Электрик» и перешла к постройке колес Кэртиса со вставными лопатками.

[1] По устному сообщению Р. Э. Классона; данные об испытании турбины Ридлер-Штумпфа мощностью в 2000 квт имеются в статье Rötscher Forschungsarb., Heft 50.

[2] A. Stodola, цит. соч., стр. 495 и каталог фирмы.

Первая, построенная в 1904 г. по этой системе турбина имела мощность 1 000 квт и 2 ступени давления, по две ступени скорости в каждой. Число оборотов ее равнялось 3 000, скорость на окружности — 376 м/сек. Эта турбина дала при испытаниях прекрасные результаты. Поэтому она была положена в основу выработанного нормального типа, по которому было исполнено свыше 300 турбин. Эти турбины отличались чрезвычайной надежностью в работе, и некоторые из них работают и по настоящее время.

Одновременно с этими турбинами завод «Всеобщей компании электричества» выполнял турбины, мощностью в 3 000 квт при 1 500 оборотах и в 5 000 квт при 1 000 оборотах. Эти турбины были исполнены в виде колеса Кэртиса в части высокого давления и нескольких активных простых колес. Затем на заводах «Всеобщей компании электричества» начинается период развития крупного турбостроения, с усовершенствованием отдельных деталей и повышением мощности отдельных единиц. Из этих усовершенствований можно отметить важнейшие:



Фиг. 195

1907 г. — замена дроссельного регулирования с ручным закрыванием части сопел — автоматическим регулированием с вертикально-движущимся перекрытием сопел.

1907 г. — первая турбина с отбором пара и автоматическим регулированием давления.

1910 г. — замена вертикально-движущегося перекрытия сопел закрыванием групп сопел при помощи вала с кулачными шайбами.

1912 г. — движение регулирования посредством вращающейся шайбы.

1913 г. — первая турбина с отбором пара и двойным автоматическим регулированием помощью закрывания сопел.

1916 г. — постройка 4 турбин по 50 000 квт для электрической станции в Гольденбергверке в Рейнской Вестфалии.

Турбины эти долгое время были самыми крупными единицами их в свете как в отношении паровой, так и электрической части.

Характеристика стационарного паротурбостроения к моменту начала мировой войны и в первые годы после войны

Производство турбины типа Кэртиса не было охранено в Европе патентом; [1] поэтому многие фирмы, строившие первоначально турбины

[1] 25-Jahre AEG-Dampfturbinen, стр. 9.

типа Рато-Целли, как мы уже говорили, перешли к постройке смешанных турбин с колесом Кэртиса в верхней части и с несколькими ступенями давления — в нижней.

Этот тип сделался наиболее распространенным перед войной на европейских и на американских заводах. Его строили «Всеобщая компания электричества», завод Бергмана, Аугсбург-Нюрнберг, Общество турбин Лаваля, «Дженераль-Электрик» и др.

Из крупных фирм, строящих реактивные турбины, надо отметить смешанные активно-реактивные турбины, строившееся заводом Броун-Бовери, и чисто реактивные турбины, строившееся попрежнему заводом Парсонса.

Наконец , некоторые заводы (Герлиц, Эшер-Висс, Сторк) продолжают строить активные турбины со ступенями только давления.

Руководящими фирмами в Европе надо считать «Всеобщую компанию электричества» и Броун-Бовери, в Америке — «Дженераль-Электрик» и Вестингауза.

Особенно характерным является в конструкциях «Всеобщей компании электричества» и Броун-Бовери стремление к уменьшению числа ступеней, связанное с увеличением теплового перепада в каждой ступени, а, следовательно, и скорости пара. Это стремление обосновывалось отчасти на опытах Кристлейна и Иоссе, [1] приведших к заключению об увеличении значения коэффициента скорости при больших скоростях пара.

Применение этих больших скоростей влечет за собой отклонение вытекающей из сопла струи (связанное с расширением в косом срезе.) При этом получаются некоторые потери энергии, понижающие общий коэффициент полезного действия турбины. Таким образом, турбины рассматриваемого типа являются образцом «дешевых» турбин, с утилизацией тепла, не доходящей до высшего возможного предела. Такие турбины соответствовали довоенным условиям (сравнительной дешевизны топлива), чем и объясняется их распространение.

Турбины «Всеобщей компании электричества» этого времени имеют одно колесо Кэртиса с 2 ступенями скорости и 4—5 ступеней давления.

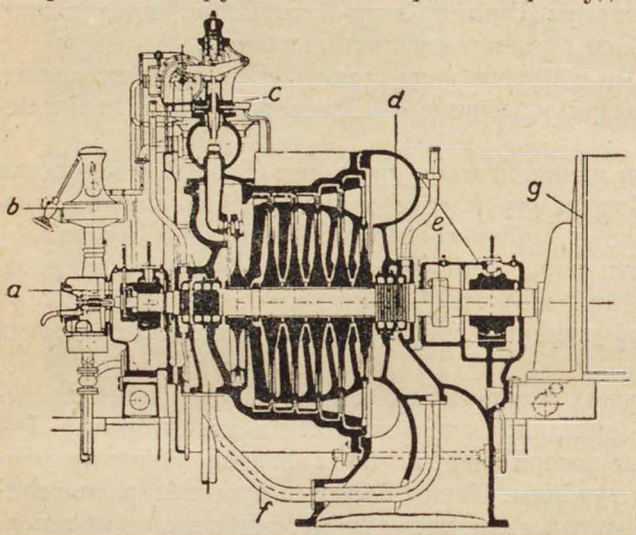
На фиг. 196 показан этот тип турбины (для мощности в 5 000 квт). По этому типу построена была самая большая турбина конца этой эпохи (1921 г.) мощностью в 50 000 квт с числом оборотов, равным 1 000 и числом колес равным 10 (одному валу).

Турбины завода Броун-Бовери (см. фиг. 197) понизили число своих ступеней для больших единиц (12 000 квт при 3 000 оборотах до 7—3 активных колеса и 4 реактивных).

---

[1] Ztschr. f. d. ges. Turb. Wes., № 1, 2, 3, 4, 1911, №№ 10, 11, 12, 13, 1912 и Jahrbuch der Schiffsboottechnischen Gesellschaft, стр. 2081, 1911. Результаты этих опытов с вытекающими из них следствиями приведены в статье А. А. Радцига «Новейшие исследования явлений в соплах паровой турбины» в сборнике «Успехи тепловой техники», Л., 1924.

Особенное место среди довоенных (и послевоенных) турбин занимают турбины Юнгстрема (завод в Фингспонге [1] в Швеции). Это единственная довоенная конструкция паровых турбин радиального типа, имевшая успех и приобревшая прочное место в промышленности. Турбина Юнгстрема состоит из двух дисков, соединенных каждый со своим генератором и вращающихся в противоположные стороны. Подвижные лопатки какого-либо одного диска являются направляющими аппаратами для подвижных лопаток следующего ряда другого диска. Таким образом, если абсолютная скорость на окружности одного ряда есть u, то относительная скорость соседнего ряда другого диска будет равна $2u$ и теоретическое отношение скорости на окружности к скорости пара будет равно $\frac{2u}{C}$, т. е. его можно будет значительно легче осуществить при меньшем числе ступеней, чем для обыкновенных аксиальных турбин [2] (фиг. 198).



Фиг. 196

Турбины Юнгстрема отличались тщательной разработкой деталей и прекрасным выполнением. Они имеют малый вес и занимают малую площадь. Потребление пара в них достигает значений, полученных наилучшими паровыми турбинами.

Все эти качества обеспечили им известное распространение. Но до сих пор они не строятся больших мощностей и до недавнего времени не превосходили 10 000 квт.

Что касается параметров, при которых работали лучшие турбины этой эпохи, то они были довольно однообразные: давление выпуска 14—15 ата, температура 300—350°, противодавление 0,05—0,03 ата. Расход получался равным 4,8—5 кг на квт-ч, относительный коэффициент полезного действия (относительно к электрической мощности) 0,75—0,76. [3]

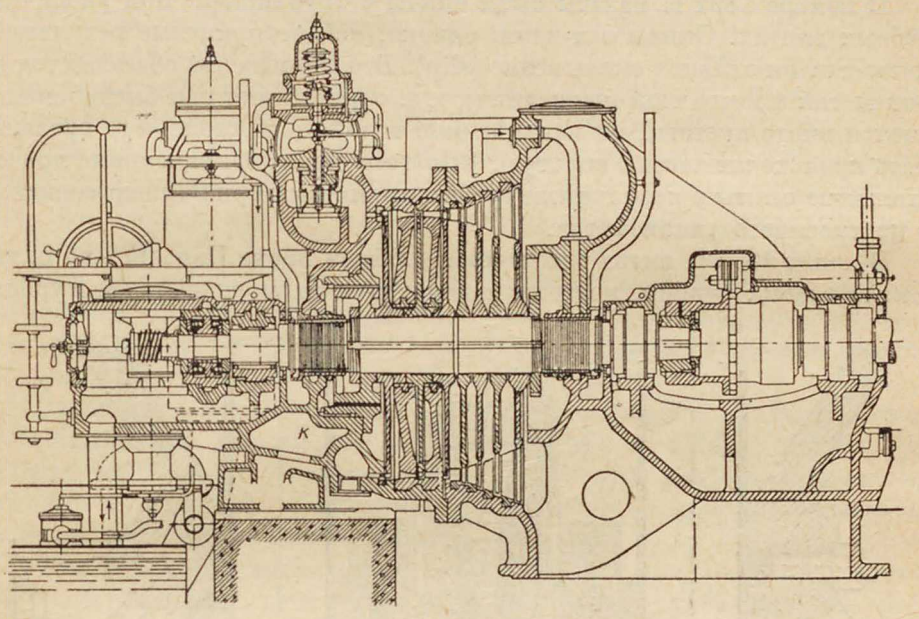
Здесь следует упомянуть о турбостроении в дореволюционной России. Но о нем можно сказать очень мало: стационарные турбины строились и при том в очень незначительном количестве только на Металлическом

[1] Каталог фирмы Юнгстрем (Ljungström).

[2] Так как у них нет неподвижных частей и все расширение происходит в подвижных лопатках, то их можно считать чисто реактивными турбинами.

[3] Schwarzweber. Z. f. d. gesammt. Turb. Все данные об опытных турбинах того времени содержатся в известной работе Baumann, Journ. of the nst. of Electr. Eng., т. 48.

заводе в Петербурге. Первоначально этот завод находился в связи с заводами, строящими турбины системы Рато, а затем вошел в связь с заводом «Всеобщей компании электричества» и строил турбины типа этого завода, но число построенных им до революции стационарных тур-



Фиг. 197

бин было чрезвычайно незначительно, — всего 26 турбин, общей мощностью около 9000 квт, с наибольшей мощностью отдельной турбины 1250 квт. [1]

Несколько большие достижения были получены в России в области судовых паровых турбин, о которых мы будем говорить дальше.

Судовые турбины

Заслуга применения паровой турбины в судостроении всецело принадлежит Парсонсу. [2] Он начал около 1894 г. опыты с моделями небольших лодок с гребными винтами, приводимыми в движение свернутой резиной. Опыты производились на пруду в Райтоне на Тайне, где жил в то время Парсонс, причем модель получила скорость до 6 узлов при 130 оборотов винта.

Затем эти опыты были перенесены на пруд в Гитоне, причем было найдено, что удовлетворительное действие гребного винта получается при 8000 оборотов в минуту.

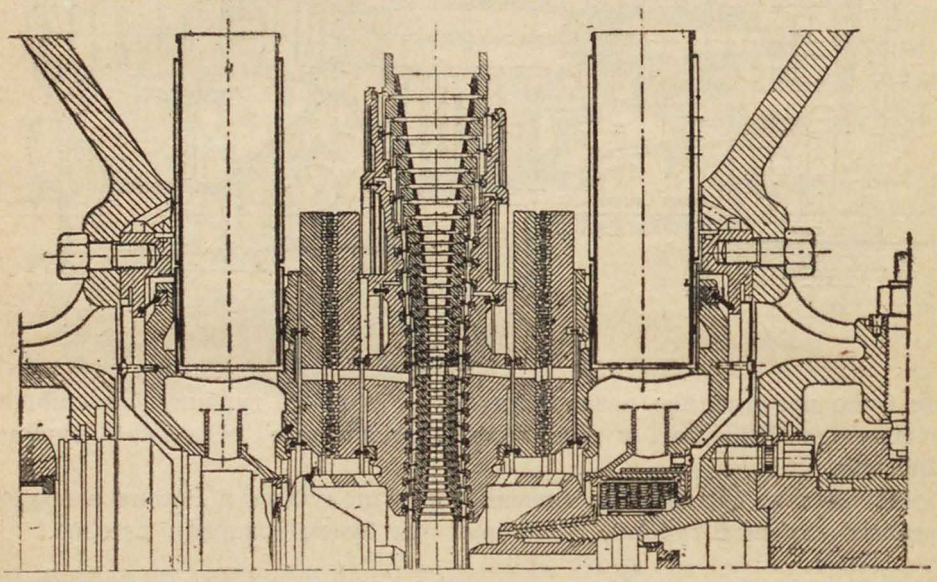
[1] См. «Перечень стационарных паровых турбин, исполненных Ленинградским металлическим заводом им. 1 Октября 1928 г.» (издание Мет. завода).

[2] A. Richardson, цит. соч., стр. 69 и след.

Эти опыты повели к постройке в 1894 г. опытного судна названного «Турбиния». На этом судне поставлена была еще радиальная турбина Парсонса, так как права Парсонса на производство турбин осевого типа еще не были восстановлены.

В ноябре 1894 г. начаты были опыты с «Турбинией» при различных гребных винтах. Опыты эти дали, однако, неблагоприятные результаты: винты давали сильное скольжение (slip). Это скольжение объясняется явлением так называемой «кавитации», т. е. образования при быстро вращающемся винте пустоты, не наполненной водой, вследствие чего вращение винта происходит частью впустую. [1] Поэтому понадобились новые продолжительные опыты с различными гребными винтами при помощи специально построенного динамометра.

В конце 1895 г. вновь восстановлены были права Парсонса на производство осевых турбин, поэтому и первоначальные радиальные турбины



Фиг. 198

на «Турбинии» были заменены тремя осевыми турбинами высокого, среднего и низкого давления, на которые поставлены были три гребных винта, с числом оборотов в 2 200, давшие более удовлетворительные результаты, которые повели к новой установке на «Турбинии».

Испытания 1896 г. дали возможность получить скорость в 32 узла. Эти результаты вызвали большое внимание в Англии, в 1897 г. с «Турбинией» были произведены обширные опыты проф. Юингом. [2] Результаты этих испытаний оказались очень благоприятными, прежде всего в отно-

[1] Это явление было обнаружено и изучено впервые Торникрофтом и Барнаби в 1893. г.

[2] Proc. of the Inst. of. Naval Architects, стр. 293, 1897 г.

шении достигнутой скорости судна (скорость при испытаниях менялась от $6^3/_4$ до $32^3/_4$ узла), причем самые благоприятные результаты получились при числе оборотов боковых винтов, равном 2 230 в минуту и центрального винта в 2 000 в минуту.

В опыте турбины работали при давлении впуска, равном 14,8 ата, и противодавлении, равном 0,24 ата (пар был, конечно, насыщенный; применение перегретого пара в судовых установках началось только значительно позже, в 1925—1926 гг.). При этих условиях потребление пара оказалось равным 13,2 кг на одну эффективную силу (отнесенную к мощности, развитой на гребном винте). Этот расход пара оказался меньшим, чем расход, полученный для поршневых машин, поставленных на аналогичные суда.

Эти замечательные результаты, полученные Парсонсом, побудили английское адмиралтейство заказать ему 2 турбинных быстроходных контр-миноносца (со скоростью в 30 узлов), которые получили название «Кобра» и «Випера» (водоизмещением в 370—390 т).

Результаты первых опытов с этими судами также оказались вполне благоприятными. Однако, оба эти судна погибли в 1901 г. от случайных причин, нисколько не связанных с применением на них в виде двигателей паровых турбин вместо паровых машин, и окончательные, длительные опыты не могли быть с ними произведены.

Тем не менее, английское адмиралтейство продолжало в ближайшие годы заказывать контр-миноносцы с паровыми турбинами: «Велокс»— в 1902 г., «Эмден» — в 1903 г.

В этом же периоде (в 1902 г.) паровые турбины были поставлены на небольшом быстроходном крейсере «Аметист», одном из четырех однотипных крейсеров, причем на три остальных были поставлены паровые машины. Это дало возможность сравнения между судовыми машинами и турбинами, причем результаты оказались благоприятные для турбин.

В эти же годы начинается применение паровых турбин на коммерческих судах. Первым пароходом этого типа был «Король Эдуард» (1901 г.) с водоизмещением в 650 т; пароход этот предназначался для перевозки пассажиров по р. Клайд. Для той же цели в 1902 г. был построен второй пароход «Королева Александра».

В том же 1902 г. началась постройка пассажирских пароходов для перехода Па-де-Кале; первым таким пароходом был «Королева», в 1903 г. построен был пароход «Брайтон» для рейсов между Ньюгэвеном и Дьеппом. В этом же 1903 г. построено было несколько яхт с паровыми турбинами; одна из них была первым турбинным пароходом, переплывшим Атлантический океан. Затем применение паровых турбин в коммерческих (почти исключительно пассажирских) судах продолжало довольно медленно развиваться в довоенное время. В область самого крупного военного судостроения паровая турбина вошла после применения своего в 1905—1906 гг. на броненосце «Дредноут», произведшем и в других отношениях крупнейший переворот в военном судостроении. После успеха «Дредноута» постройка военных турбинных судов началась

с лихорадочной быстротой во всех странах, так как это время совпадает с крайним развитием империалистических тенденций во всех крупных странах и с подготовкой их к близкой войне.

Перечисление дальнейших судов с паровыми турбинами делается поэтому невозможным.

По сведениям фирмы Броун-Бовери [1] одних судовых турбин Парсонса было построено и находилось в постройке до 1 августа 1906 г. — 90, общей мощностью в 975 000 л. с.

В этом же году построены были также крупнейшие пассажирские пароходы «Лузитания» и «Мавритания», водоизмещением по 41 500 т с общей мощностью турбин равной 70 000 л.с. в каждом.

Не входя в дальнейшее перечисление судов, укажем только на особенности судовых турбин первоначального типа (с непосредственной передачей к гребному валу).

Как уже было указано, число оборотов таких турбин приспособлялось к числу оборотов гребного вала,а потому даже в быстроходных судах получалось малым, сравнительно с числом оборотов стационарных паровых турбин, что влекло за собой чрезвычайное увеличение размеров судовых турбин.

Так, например, в поверочном расчете турбины «Мавритания» (сделанном Стодола [2]) принято нормальное число оборотов турбины равное 194 в минуту, при скорости в 25 миль в час. При этом расчетном числе оборотов получились следующие размеры турбин: диаметр турбины высокого давления 2 600 мм (расстояние между серединами лопаток), диаметр низкого давления 3 940 мм, длина турбины высокого давления 7 500 мм, низкого давления 5 600 мм, длина лопаток в части высокого давления: первых 63,5 мм, последних 305 мм, в части низкого давления — соответственно 203 и 560 мм. Вес ротора высокого давления (с валом) 72 т, низкого давления 126 т.

Вся турбинная установка отличалась большой сложностью, так как нужно было обслуживать 3 или 4 гребных вала; кроме главных турбин нужно было еще иметь так называемые «маршевые турбины» (или «крейсерские» турбины) для небольшой нормальной скорости и, наконец, турбины обратного хода.

Типичное расположение, предложенное Парсонсом для военных кораблей с 4 валами, изображено на фиг. 199.

Более простые устройства системы Кэртиса («Всеобщей компании электричества») находили меньшее применение. Их отличительной особенностью являлось распределение каждой пары турбин высокого и низкого давления на одной и той же оси (см. фиг. 200). [3]

Все указанные особенности судовых турбин делали возможным их применение почти исключительно на военных судах и на быстроходных

---

[1] Паровая турбина системы Броун-Бовери-Парсонс, изд. 4-е.

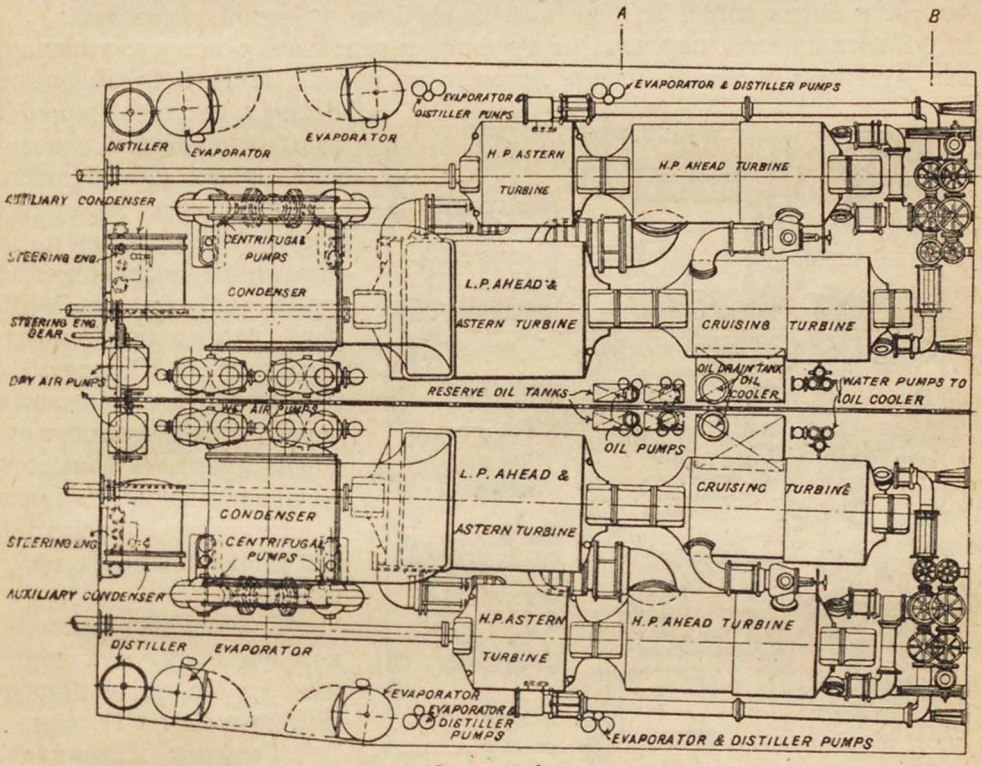
[2] A. Stodola, цит. соч., стр. 632 и след.

[3] Bauer und Lasche, Schiffsdampfturbinen, отдел VII, 1909.

пассажирских, причем вес их получался даже больше, чем вес соответствующих установок с паровыми машинами (для линейных кораблей).[1]

Поэтому уже весьма рано стало проявляться стремление к применению тех или иных передач, которые позволили бы освободиться от одинакового числа оборотов турбины и гребного вала.

Таких способов передачи предлагалось три: зубчатая передача, электрическая передача и гидравлическая передача Феттингера. Первым



Фиг. 199[2]

по времени было предложение зубчатой передачи, сделанное самим Парсонсом уже в 1909—1910 г. на корабле «Веспасиан». От оси турбин сделана была зубчатая передача с передаточным числом 1 : 19,9, что давало число оборотов гребного вала 65—70 (т. е. то же, что и паровые машины, первоначально поставленные на «Веспасиане»).

---

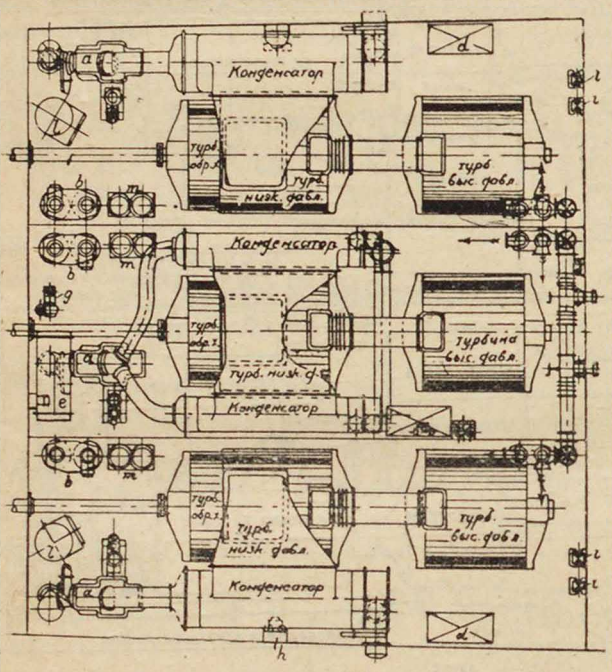
[1] Bauer und Lasche, цит. соч., стр. 1.

Скорость, выше которой турбинные суда получали преимущество над судами с паровыми машинами, — 16—18 узлов. М. Яновский, Морские паровые турбины, стр. 9, Ленинград, 1925.

[2] H. P. Ahead-Turbine — турбина высокого давления прямого хода; H. P. Astern-Turbine — обратного хода; L. P. Ahead-Turbine — низкого давления прямого хода; Cruising-Turbine — для крейсерского хода.

Хотя результаты применения зубчатой передачи на корабле «Веспасиан» были весьма благоприятны, однако сильное распространение этих передач началось позже, к началу мировой войны и во время нее; после же войны применение зубчатых передач дало сильнейший толчок к распространению паровых турбин и в коммерческом флоте. Гидравлическая передача была предложена немецким инженером Феттингером (в 1910 г.),[1] но она нашла применение до войны только в некоторых судах немецкого флота, а после войны вообще вытеснена была зубчатой передачей.

Электрическая передача от турбины к отдельному мотору, управляющему гребным валом, нашла применение прежде всего в Соединенных Штатах, где она применялась на некоторых довоенных судах (New-Mexico, Tenessy и др.), затем она применялась также и на некоторых коммерческих судах (турбины судна Mjalner, построенные шведским заводом Юнгстрем),[1] но в общем электрическая передача не получила в судовой практике большого распространения и только в последнее время к ней вновь начинают обращаться.



Фиг. 200

Скажем еще несколько слов о судовых паровых турбинах, построенных до войны в России.

Турбины строились исключительно для военных судов, причем для линейных кораблей и больших крейсеров применялись турбины Парсонса, право производства которых было приобретено Балтийским судостроительным, Франко-Русским (ныне завод им. Марти) и Николаевским судостроительными заводами.

Турбины для более мелких судов (контр-миноносцев и небольших крейсеров) строились Металлическим заводом по типу «Всеобщей компании электричества», заводом Беккер в Риге и Судостроительным заводом в Ревеле.

В общем, эти русские заводы в ту эпоху не внесли чего-либо особенно нового в конструкцию паровых турбин.

---

[1] A. Stodola, цит. соч., стр. 426—427.

В заключение этого краткого обзора довоенного морского судостроения, следует упомянуть еще о соединенной системе паровых машин и паровых турбин, применявшейся на нескольких пароходах до войны и применяемой также и в настоящее время (в комбинации с зубчатой передачей — система Бауэр-Вах).

Первыми турбинами, построенными по этой системе, были турбины парохода «Отаки» для Ново-Зеландской судостроительной компании, а затем последовал целый ряд аналогичных установок, из которых наибольшей известностью пользуются суда «Олимпик» и «Титаник», построенные в 1909 — 1911 г. фирмой Гарланд и Вольф для компании «White Star» («Титаник» трагически погиб в Атлантическом океане вследствие столкновения с плывучей ледяной горой). Все эти суда строились по такой системе: имеется 3 гребных вала; два внешних приводятся в движение паровыми машинами, на среднем поставлена паровая турбина. В паровых машинах пар расширяется до 2—1,7 ата и переходит в турбину, в которой происходит дальнейшее расширение до давления конденсатора.

Резюмируя все сказанное о развитии паровой турбины от самых первых попыток ее создания у Лаваля и Парсонса до конца мировой войны, можем сказать, что паровая турбина выросла за это время от машин с ничтожными мощностями в 3—5 л. с. до громадных единиц в 50 000 квт, отличающихся надежностью в работе и оставивших далеко за собой лучшие паровые машины по расходу пара. Число оборотов паровой турбины совершило за это время переход от чрезмерно большого числа оборотов в турбинах Лаваля к умеренному числу оборотов в турбинах Парсонса и затем начало постепенно вновь возрастать, стремясь достигнуть нормального числа оборотов, примерно, около 3 000 в единицах все большей и большей мощности.

Число оборотов паровых турбин совпадало с числом оборотов ротора генератора, посаженного с ним на одном валу, с полным устранением особого передаточного механизма между турбиной и генератором.

Основные параметры работы паровой турбины к этому времени — давление и перегрев при впуске — достигли наибольших значений, применяемых в тогдашних паровых машинах.

Наконец, достигнут был ряд конструктивных усовершенствований в отношении отдельных деталей, дисков, лопаток, их изготовления и закрепления, подшипников, уплотнений и т. д.

ЧЕТВЕРТЫЙ ПЕРИОД

ТЕПЛОТЕХНИКА

ПОСЛЕВОЕННОГО ВРЕМЕНИ

Глава I

ПОСЛЕВОЕННЫЕ ПАРОВЫЕ МАШИНЫ

Характеристика постройки и применения паровых машин в разных областях в послевоенном периоде

Послевоенная эпоха в развитии теплотехники может быть разделена на два периода: первый от конца мировой войны приблизительно до 1929 г. и второй — от 1929 г. до настоящего времени. Первый период характеризуется в Западной Европе и Соединенных Штатах введением крупных усовершенствований в областях тепловых двигателей и паровых котлов. Усовершенствования эти связаны были со стремлением повысить использование тепла в тепловых двигателях и вообще в тепловых установках в виду недостатка топлива и его дороговизны, вызванных войной. Второй период характеризуется во всех капиталистических странах крайним замедлением в прогрессе теплотехники, связанным с общим экономическим кризисом, охватившим эти страны. Во многих случаях в этих странах наблюдается полная остановка и даже регресс в области теплотехники. Обратную картину представляет послевоенное развитие в СССР. Первый период от окончания гражданской войны в 1920 г. до начала первой пятилетки (1928 г.) — есть реконструктивный период, когда производство тепловых двигателей и паровых котлов было восстановлено с некоторыми частичными улучшениями по сравнению с дореволюционной эпохой. Второй же период — первая пятилетка и начало второй характеризуется чрезвычайным подъемом теплотехники в СССР во всех ее разветвлениях.

Эти успехи теплотехники в СССР, связанные с особенностями социалистического хозяйства, дали возможность советской теплотехнике во многих областях достигнуть уровня западно-европейской и американской, иногда же поставить совершенно новые задачи, постановка которых не под силу современному капитализму.

Задача последующего изложения — проследить в частностях указанные процессы.

Кульминационным пунктом развития паровой машины, как было указано, надо считать 1900 г. К этому времени в ней введены были почти все крупные усовершенствования, чрезвычайно снизившие в ней расход пара и давшие ей возможность удовлетворять почти

всем требованиям растущей электротехники того времени: применение пара достаточно высокого давления (по тогдашнему масштабу) —12—14 ата, а в паровозах даже до 16 ата, высокого перегрева (до 300—350°, введенного по инициативе В. Шмидта), большая равномерность и хорошее регулирование, высокий коэффициент механического полезного действия, весьма ссвершенные (хотя и сложные) системы парораспределения, в соответствующих случаях — центральная конденсация.

В первом десятилетии XX века паровая машина была, однако, в значительной степени вытеснена из области крупных электрических станций паровой турбиной и испытывала сильную конкуренцию в области мелких и средних отдельных стационарных установок со стороны дизельмотора (и других двигателей внутреннего сгорания).

Эта же конкуренция начинала уже чувствоваться и в области судовых машин. Таким образом, за паровой машиной остались только некоторые специальные области: мелкие установки с утилизацией специальных топлив (где могли с успехом применяться локомобили), [1] установки не особенно крупных размеров с утилизацией отходящего тепла, локомотивы, машины металлургических и горных заводов (прокатные,подъемные), поскольку там не была проведена полностью электрификация,[2] судовые машины. Самыми крупными усовершенствованиями паровой машины, предложенными в том периоде, были клапанное распределение Лентца (вызвавшее много других аналогичных по идее распределений) и особенно — введение прямоточных машин Штумпфа, чрезвычайно упрощающее тип паровой машины при сохранении хорошей утилизации тепла. Машины Штумпфа нашли широкое применение и в послевоенной практике. Новая эра для паровой машины началась после 1921г., когда были опубликованы опыты В. Шмидта с паром высокого давления.[3]

В. Шмидт начал свои опыты еще в 1910 г. и прежде всего выработал тип котла для этого высокого давления. При этом он отказался от типа котлов Серполе (в виде змеевика), обыкновенно применявшихся для очень высоких давлений, в виду трудности их чистки и перешел к типу водотрубных котлов с сильно наклоненными трубами (вроде Ярроу).

В конце концов ему удалось построить такой котел на 60 ата давления с поверхностью нагрева в 72 м^2 и площадью колосниковой решетки, сначала в 1 м^2, а окончательно — в 1,44 м^2, при чем на ней могло быть сожжено до 100 кг угля на 1 м^2 в час, уголь с теплотворной способностью в 7 500 кал. Этот котел давал при этом в час до 1 340 кг пара. Особенных трудностей при обращении с этим котлом не встретилось (трудно было подобрать подходящие водомерные стекла и материал для уплотнений

[1] К. Векселъ. Современные локомобили с перегревом пара. Вестн. инженеров, № 4, 1931.

[2] См., например, описание крупной установки шахтной и подъемной прямоточной машины в журнале Engineering, 20 мая 1921.

[3] Подробные сведения об этих опытах были изложены в докладе Гартмана (Hartmann) на Съезде общества немецких инженеров в 1921 г. и помещены в Z. d. VDI, №№ 26, 27, 28, 32 и 38, 1921.

в паропроводе; для последней цели оказался подходящим клингерит). Устройство паропровода очень облегчено было его малым сечением, равным только 1/6,3 площади обыкновенного паропровода для такого же количества пара при давлении в 10 ата.

Первые опыты с паром высокого давления В. Шмидт произвел с машиной тендем с цилиндрами простого действия, применявшимися им в первых конструкциях машин с высоким перегревом пара.

Число оборотов было взято равным 150, парораспределение — клапанное. Расход в калориях в час на индикаторную силу получался от 2 410 до 2 390 (соответственно 22 ата и 44 ата давления впуска).

Эти опыты обнаружили низкий термодинамический коэффициент полезного действия цилиндра низкого давления: около 50% в то время как цилиндр высокого давления давал величины для этого коэффициента, лежавшие между 87,6—88,5.

Дальнейшие усилия В. Шмидта были направлены на увеличение именно коэффициента полезного действия цилиндра низкого давления: для этого он применил промежуточный перегрев пара, чтобы обеспечить сухость его во время работы в цилиндре низкого давления. Кроме того, он применил очень большое расширение, присоединив к первоначальным 2 цилиндрам еще два, так что машина получилась с 4-кратным расширением.

Окончательные опыты 1921 г. с этой машиной 4-кратного расширения, при давлении впуска 60 ата, и температуре пара в 400° (при общей мощности машины $N_i = 147{,}4$), дали расход пара в час на индикаторную силу, равный 2,35 кг, что соответствует расходу в 2 070 кал. (отнесенному к воде при 0°).

Таким образом получается термический индикаторный коэффициент полезного действия, равный 632 : 2070 = 0,305. Так как коэффициент механического полезного действия получился равный около 0,92 и котла — 0,8, то полный экономический коэффициент получился равный:

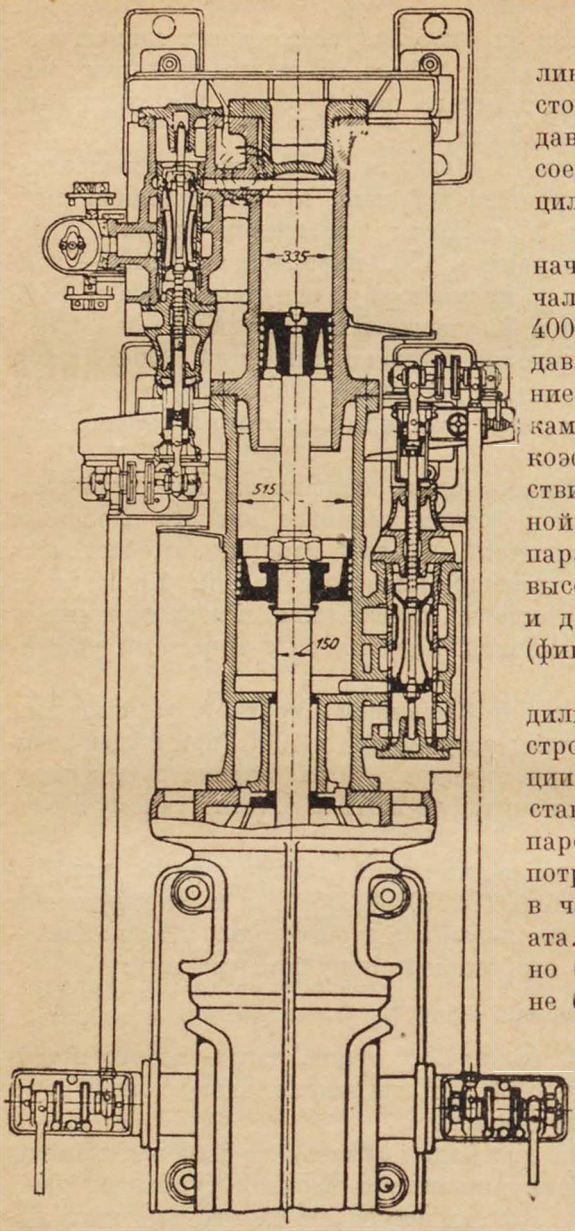
$$0{,}305 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}8 = 0{,}2,$$

т. е. получилось использование около 23% тепла, заключенного в топливе — результат не превзойденный, как мы видели, даже самыми лучшими паровыми турбинами того времени.

Результаты опытов Шмидта позволяли думать, что паровая машина получит возможность вновь конкурировать с паровой турбиной, даже при больших мощностях. Однако, до сих пор паром самого высокого давления больше воспользовалась паровая турбина, чем паровая машина. Все же в новейшее время в области стационарных машин, особенно высокого давления, имеется ряд очень интересных установок.

Так, большое внимание обратили на себя машины высокого давления завода Борзига. Одна из таких машин, испытанная Иоссе,[1] работала при следующих условиях:

[1] Josse, Hochdruckdampf., II.



Фиг. 201

Машина 2-цилиндровая, цилиндр высокого давления — простого действия, цилиндр низкого давления — двойного действия, соединенный непосредственно с цилиндром высокого давления.

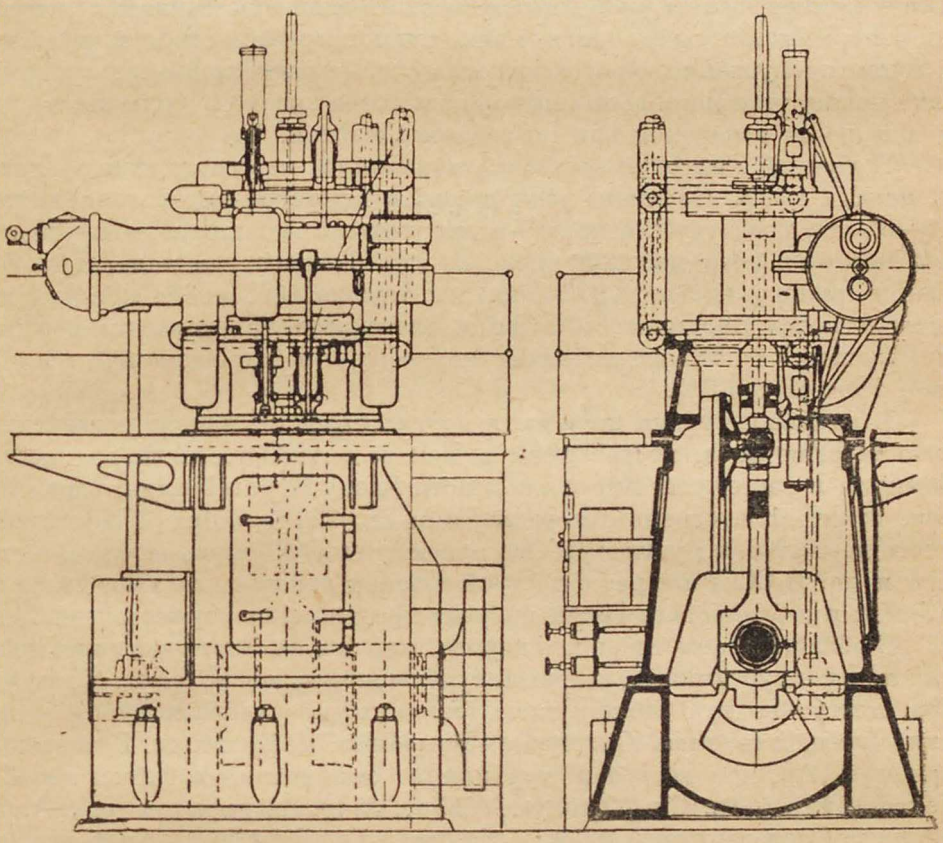
Общая мощность — 760 л. с., начальное давление 60 ата, начальная температура перегрева — 400°. Машина работает с противодавлением в 10 ата. Распределение — цилиндрическими золотниками Гохвальда; относительный коэффициент полезного действия (отнесенный к индикаторной мощности и полному расходу пара) получается для цилиндра высокого давления равным 92,7% и для низкого давления—88,5% (фиг. 201).

Еще больший интерес возбудили машины того же завода, построенные для американской станции Филипп Кэри и К°. На этой станции нужно было поставить паровой двигатель в 6 000 квт с потреблением пара, равным 54,5 т в час, при противодавлении в 3 ата. Для этой последней цели нужно было, чтобы двигатель тратил не более 9,1 кг на киловаттчас. Американские заводы паровых турбин не могли гарантировать этого расхода при этих условиях работы. Поэтому заказ был передан заводу Борзига, который поставил паровую машину с давлением в 126 ата и с температурой свежего пара, равный 426,6°.

Машина этого тройного расширения вертикальная. Число цилиндров 5: 2 цилиндра высокого давления простого действия, 2 цилиндра среднего давления тоже простого действия и один цилиндр низкого давления двойного действия. [1]

[1] См. статью «Operating experiments with 180 lbs steam of Plant Carey», Power, April, 1933 и Z. d. VDI, № 16, 1935.

Другую машину высокого давления предлагал Леффлер[1] для использования пара из известного котла высокого давления своей системы. Минимальным пределом для выгодного применения паровой турбины он считает 3000 квт. При меньших мощностях в области высокого давления паровая машина может иметь, по его словам, значительно больший относительный коэффициент полезного действия, чем паровая турбина, а именно коэффициент, доходящий до 90%, в то время как паровая турбина этой мощности имеет коэффициент полезного действия не выше 70%.



Фиг. 202

По инициативе Леффлера был построен один цилиндр высокого давления для работы в нем при начальном давлении в 120 ата и температуры в 480° и противодавлении в 12 ата с мощностью, равной приблизительно 600 л. с. (фиг. 202).

Далее им спроектированы были конденсационные паровые машины двойного и тройного расширения для пара с начальным давлением в 130 ата. Леффлер считает более рациональной конструкцией 3-цилиндровую

[1] Löffler. Hochdruckdampf. II.

машину и считает также возможной замену 3-го цилиндра паровой турбиной низкого давления.

Последняя комбинация представляет собой осуществление системы Бауер-Вах, получившей, как было выше сказано, распространение в судовых установках.

В своей статье Леффлер говорит о применении паровых машин высокого давления в локомотивах. Такое применение тоже имеет место. Большой известностью пользуется локомотив высокого давления Шмидта. В нем применен специальный котел высокого давления Шмидта с получением пара высокого давления не прямо путем нагревания горячими газами, а путем пропускания через тело котла особых элементов с циркулирующим паром, отдающим свою теплоту воде котла высокого давления и доводящим ее до испарения при указанном давлении. [1]

В цилиндре высокого давления применялся пар давлением в 60 ата. В опытах проф. Нордмана получились в цилиндре высокого давления 46—54 ата, в водотрубном котле—с циркуляцией воды и пара,—65—88 ата, а в котле низкого давления около 10 ата. Температура пара, приходящего в цилиндр высокого давления, менялась от 360° до 388°. Результаты опытов проф. Нордмана были очень благоприятны; сравнение с одним из лучших новейших немецких паровозов, работавшим при 16 ата, дает экономию в 8%.

В настоящее время имеются и другие паровозы высокого давления; например, паровоз, построенный в Канаде в 1930 г., тоже по системе Шмидта, в мастерских Ангус для дороги Rocky-Mountains инженером Бовен, отличается огромными размерами: вес 220 т, длина 30,23 м, мощность до 4000 л. с.; упомянем еще локомотивы Леффлера, завода Винтертур и др. В СССР вопрос о постройке таких локомотивов тоже стоит на очереди и в ближайшее время получит практическое осуществление.

В области локомотивов для паровой машины высокого давления предвидится конкуренция со стороны турболокомотивов и дизельлокомотивов. Постройка турболокомотивов тоже находила многочисленные решения: турболокомотивы Юнгстрема, Эшер-Висс, Маффеи и др. В новейшее время в Англии построен турбинный локомотив, работающий без конденсации (Gén. Civ., 2 полуг., 1935 г., № 9). По расчетам инж. А. А. Чиркова (сделаны в чрезвычайно обстоятельной статье его, помещенной в «Изв. Теплотехн. инст.» за 1931 г.), турбинный локомотив может быть построен проще и даст результаты, не уступающие поршневым паровозам высокого давления. Идею А. А. Чиркова о желательности постройки в СССР мощных турболокомотивов (наряду с локомотивами высокого давления с паровыми машинами) следует признать правильной.

Третий конкурент паровой машины в области железнодорожных механизмов — дизельлокомотив нуждался бы в специальном обзоре,

---

[1] Схема работы котла Шмидта помещена ниже в разделе, касающемся паровых котлов.

тем более, что значение его для некоторых районов СССР, бедных водою, может быть очень велико. [1]

Ранняя история дизельлокомотива много раз излагалась в русских технических изданиях и может считаться общеизвестной.

Известна также крупная роль, сыгранная СССР в деле развития тепловоза, известны также трудности, которые встречаются на пути создания дизельлокомотивов. Главная из них — необходимость введения той или иной передачи между дизельмотором и ведущими колесами локомотива. В виде такой передачи предлагались электрическая, гидравлическая, чисто механическая, пневматическая. Технически вполне разработанной является электрическая, и проблема дизельэлектровоза может считаться решенной, но решение это даст локомотив дорогой и тяжелый, поэтому техническая мысль продолжает искать других решений.

Из новейших предложений следует упомянуть о тепловозе германских железных дорог с пневматической передачей, тепловозе завода Ансальдо в Италии и тепловозе с непосредственной передачей.

Первый из них имеет мощность, равную 1 200 л. с., 6-цилиндровый вертикальный бескомпрессорный дизельмотор, работающий при 450 оборотах в минуту. На одном валу с дизельмотором насажен 2-цилиндровый компрессор, одноступенчатый, двойного действия, сжимающий воздух до 7 ата. Сжатый воздух проведен в подогреватель, работающий по принципу противотока, где он подогревается до 360° отходящими газами от дизельмотора. Сжатый воздух работает в 2 горизонтальных цилиндрах, так же как пар в паровозе. Число спаренных осей — 3, тип локомотива 2—3—2.

В дизельлокомотиве Ансальдо (построенном для итальянских государственных железных дорог) передача от дизельмотора — механическая, пускание же в ход достигается из резервуара сжатого воздуха; последний работает на цилиндры продувочных насосов, превращающихся на это время в движущиеся цилиндры локомотива. Дизельмотор шести-цилиндровый, горизонтальный, 2-тактный, типа Юнкерс (с противоположно двигающимися поршнями). Мощность его 1 100 л. с. при 800 оборотах. Вес дизельлокомотива —84 т, скорость —75 км/час.

В новейшее время делаются новые попытки создания дизельлокомотива с непосредственным действием двигателя на ведущие оси. Такая попытка сделана заводом Отто-Дейтц, [2] но результаты эксплоатации такого тепловоза еще не выяснены.

---

[1] Обзор тепловозостроения в СССР и характеристика новейших конструкций тепловозов в книге П. В. Якобсона «Тепловоз», Гострансиздат, 1932.

[2] См. статью A. Langen «Die Diesellokomotive mit immitelbarem Antrieb». Forschungsarbeiten, H. 363, 1933.

Delongue. Les locomotives Diesel actuelles à transmission directe. Gén. Civil. 2-е полугодие, 1934, № 1.

В Италии в новейшее время предложен дизельлокомотив с пневматической передачей сист. Царлатти (Zarlatti); см. статью Delongue, Gènie Civil, 29 сент. 1934.

Обыкновенное локомотивостроение также развивается и в области его делается ряд предложений, направленных к повышению использования в них тепла, например, введение подогрева питательной воды, применение тройного расширения пара [1] и др.

Несмотря на указанные успехи дизельлокомотивов (а также и возрастающее применение электрификации железных дорог, не входящее в наш обзор), положение паровой машины в области железнодорожного транспорта является покамест наиболее прочным из всех областей ее применения.

Гораздо более вытеснена паровая машина из области морского судостроения, хотя и здесь надо констатировать большие успехи, сделанные в постройке паровых машин. При этом надо все-таки добавить, что на большинстве судов торгового флота до сих пор преобладают паровые машины; так, относительно середины 1930 г. приводятся данные, согласно которым 74,7% всемирного торгового флота все еще обслуживаются паровыми машинами.

Обращаясь к новейшим типам судовых машин, мы видим в них применение высокого давления и перегрева, связанные со многими конструктивными усовершенствованиями. Давление может доходить до 50 ата (при более высоком пришлось бы применять промежуточный перегрев, что внесло бы большие усложнения, неудобные для судовой установки), вакуум достигает обыкновенно 80%, только в прямоточных судовых машинах он берется выше. Увеличение числа оборотов связывается в новейших судовых машинах с применением особых гидравлических распределений (Мейер — Маттерна, Капротти). Из машин высокого давления обращают на себя внимание машины судна «Борнео», работавшие при 34 ата и 378°. Принцип прямоточности применен в машинах высокого давления завода Яффа (Утрехт—Голландия): строенные машины простого действия однократного расширения и более совершенные машины двойного расширения Христиансена и Майера, Борзига и Штумпфа; в последних прямоточным сделан только цилиндр низкого давления для повышения его относительного коэффициента полезного действия; цилиндр же высокого давления сделан обыкновенной конструкции, так как его коэффициент полезного действия выше.

Надо, впрочем, сказать, что в судовых паровых турбинах в новейшее время тоже стали применяться новейшие приемы для повышения коэффициента полезного действия. Такое высокое давление применяется в них уже в 1926 г. (корабль «King George V»); в 1931 г. заводом Блом и Фоссе был сделан смелый опыт паровой установки с паровой турбиной, работающей при 70—60 ата при температуре пара, равной 425 (от котла Бенсона, построенного, как обыкновенно, на 225 ата).

Эта установка сделана была на корабле «Uckermark».

Насколько можно судить по кратким журнальным сообщениям, результаты получались благоприятные (до 10% экономии по сравнению с установками обыкновенного давления).

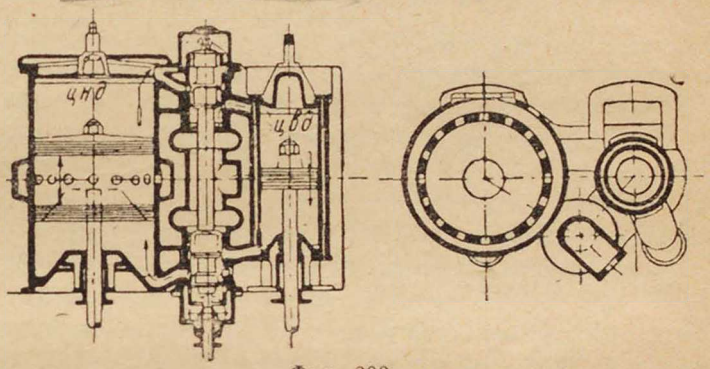
[1] La locomotive «Lorey» à triple expansion, Génie Civil, 1-е полугодие 1934, № 11

Для пароходных машин в Германии выработан нормальный тип компоунд-машин с клапанным пораспределением Лентца, причем начальное движение пара принято равным 14 ата и температура 320°. [1]

В самое новейшее время паровая машина высокого давления нашла применение в автомобильном деле. В Америке стали строиться паровые автомобили с давлением пара в 120 атм. Для этой цели был выработан специальный тип котла американцем Доблем (Doble). Котел этот состоит из трубы, согнутой в виде змеевика и питаемой автоматически, автоматически же подается жидкое горючее.

В Германии производство этих котлов и автомобилей начато на заводах Борзига в Берлине и Геншеля в Касселе. [2]

В СССР в настоящее время построен на Людиновском заводе по проекту проф. Я. М. Гаккеля первый паровой трактор; как топливо в нем приняты дрова, мощность машины — 60 л. с.



Фиг. 203

Испытания этого трактора при работе с плугом начинаются в Людиновском совхозе. [3]

Наряду с указанными специальными типами паровых машин в СССР намечена постройка и стационарных паровых машин.

По словам проф. Г. С. Жирицкого: «число советских заводов, строящих (паровые) машины, в дальнейшем несомненно увеличится, и паровой машине будет отведена важная область применения в советской энергетике». [4]

Из паровых машин, которые строятся в СССР, следует прежде всего остановиться на судовых машинах.[5] В них внесены те же усовершенствования, которые применяются в заграничных судовых паровых машинах: высокое давление пара, применение клапанных пораспределений

---

[1] Сведения о машинах Лентца и Христиансен и Майер имеются в книгах И. М. Семенова «Морские паровые машины системы Лентца и Христиансен и Майер», Ленинград, 1934. и В. А. Аничкова «Курс судовых паровых машин», 2 изд., 1395 г.

[2] Imfeld, Neue Dampffahrzeuge. Z. d. VDI, № 3, 1934.

[3] Изв. ЦИК, № 233, 1934.

[4] Предисловие проф. Г. С. Жирицкого к изданному им «Атласу паровых машин», ГНТИ, 1934.

[5] Сведения о судовых машинах, строящихся на заводах в СССР, имеются в книгах И. М. Семенова и В. В. Аничкова, на которые мы уже ссылались.

и прямоточной системы. Успеху постройки судовых паровых машин в СССР весьма содействует стандартизация их (ОСТ 3458, 3459, 3460, 3461).

Разрез цилиндра низкого давления в одной из таких машин системы Христиансен и Майер, построенной в СССР, представлен на фиг. 203.

Паровозостроение в СССР сосредоточено на небольшом количестве специализированных заводов.

На этих заводах выработаны новые типы мощных паровозов «Феликс Дзержинский» и «Иосиф Сталин», вызывающие к себе интерес и за границей. [1] В самое новейшее время в СССР исполнен исключительный по размерам и мощности паровоз типа 2—7—2.

Локомобилестроение в СССР сосредоточено на Людиновском заводе, на котором в новейшее время намечен выпуск до 4000 локомобилей в год. [2]

---

[1] См. статью «Neue russische Lokomotivbauarten», Z. d. VDI, № 5, 1934.

[2] Некоторые сведения о локомобилях Людиновского завода имеются в книге В. П. Павлова «Локомобиль и его работа», Энергоиздат, 1933.

Глава II

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ ПОСЛЕВОЕННОГО ВРЕМЕНИ

Мощность и типы современных котлов

Все новейшие успехи в области применения пара высокого давления и перегрева в паровых двигателях теснейшим образом связаны с переходом к постройке и эксплоатации паровых котлов высокого давления. Поэтому котлостроение переживает теперь эпоху такого же бурного развития, как и турбостроение, и в области постройки паровых котлов замечается еще большая неустойчивость и быстрая смена типов, чем в области паровых турбин. Поэтому характеристика успехов современного состояния котлостроения представляет большие трудности. Остановимся на главных особенностях современных котлов. Увеличение мощности котельных установок явилось естественным следствием громадного увеличения мощности электрических станций; при этом росте станций сохранение прежних размеров и прежней производительности котлов сделалось просто невозможным.

Чтобы дать понятие о мощности современной станции и производительности их котельных, приводим данные о станции Клингенберг (построенной в 1927 г.). Главных турбин установлено 3 по 80 000 квт каждая и при каждой турбине отдельная турбина в 10 000 квт для подогрева питательной воды. Таким образом, в настоящее время установленная мощность станции —270 000 квт, предвидено расширение на такую же мощность, так что полная мощность станции будет 540 000 квт. Для доставления этим турбинам пара поставлено 16 котлов по 1 800 м^2 поверхности нагрева, каждый с производительностью в 80 т пара в час для каждого котла. Пар получается при давлении в 35 ата и температуре в 410°. Производительность котла приблизительно равна 44 кг/м^2; каждый котел дает количество пара, достаточное для получения приблизительно 18 000 квт. Эти данные далеко не являются предельными. Так, на одной из станций САСШ имеется котел (Стирлинга) с поверхностью нагрева в 2650 м^2 (типа «Combustion» 3-барабанного), с производительностью около 110 т пара в час при давлении в 83,3 ата. Последние котлы, поставленные на станции Edgar (секциональные типа Бабкок и Вилькокс) с давлением, равным 95,3 ата, имеют поверхность нагрева, равную 690 м^2 для производства 114 т пара в час, тогда как котлы, поставленные на той же станции в 1927 г.,

имели при том же давлении и такой же часовой производительности пара поверхность нагрева, равную 1 402 м² (в новых котлах); взамен этого сильно увеличена поверхность экономайзера и воздушного нагревателя. Эти данные дают для нового котла производительность, равную 165 кг с 1 м² в час.

Имеются в литературе указания на котлы еще больших поверхностей нагрева, до 3 000 м².[1] Встречается также гораздо большее количество пара, даваемое одним котлом. Так, в одной из важнейших статей своих (Z. d. VDI 25 апреля 1931 г.) Мюнцингер приводит следующие данные о развитии паровых котлов (см. таблицу).

Таблица 10

Годы	Европа		Соединенные Штаты	
	Производ. котла в т/час	Система котла	Производит. котла в т/час	Система котла
1914	26	Вертик. водотрубн.	—	Вертик. водотрубн.
1915	40	» »	68	—
1924	60	» »	—	—
1925	70	» »	—	—
1929	80	» »	365	Секцион.
1929	—	—	570	Вертик. водотрубн.
1930	170	Секцион.	—	—
1930	150	Вертик. водотрубн.	—	—

По его указанию котлы для бурого угля делаются с производительностью до 100 т/час, для каменного угля со стокерами до 200 т/час и для угольной пыли — до 600 т/час. Наглядной иллюстрацией чрезвычайного роста котлов является фиг. 204, изображающая котел Бабкок и Вилькокс новейшего типа, с производительностью в 360 т/час, с углепылевым отоплением и экранной топкой; внутри этой топки помещен в том же масштабе для сравнения котел Бабкока и Вилькокса старого типа 1876 г. для получения 2,5 т пара в час.

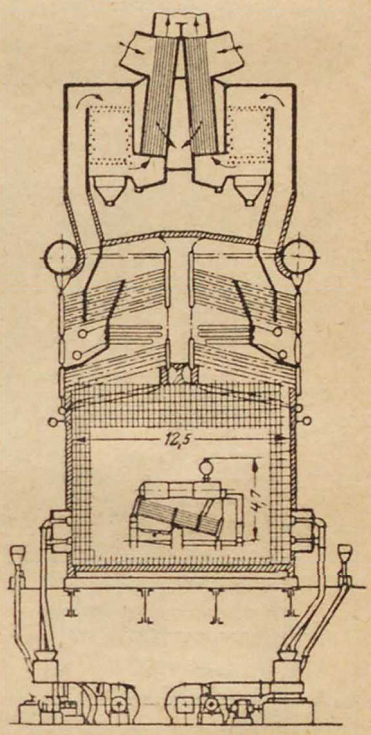
Применение высокого давления и повышение производительности котлов повели к глубоким изменениям в типе паровых котлов. Изменения эти нельзя считать законченными; развитие теплотехники продолжает ставить перед котлостроением все новые и более сложные задачи, а потому и типы котлов претерпевают постоянно изменения.

В развитии котлов высокого давления можно различить ясно два направления: одно представляет собою эволюцию типов обыкновенных водотрубных котлов, другое стремится к созданию специальных типов котлов (котлы Атмос, Шмидта, Леффлера, Бенсона, Ла Монт, Велокс и некоторые другие). В общем, повидимому, область давлений до

[1] На Каширской ГЭС второй очереди поставлено 5 котлов по 3 100 м² поверхности нагрева, каждый с производительностью 192 т пара в час.

100 ата может быть обслужена котлами нормальных типов и для специальных конструкций останется область еще более высоких давлений.

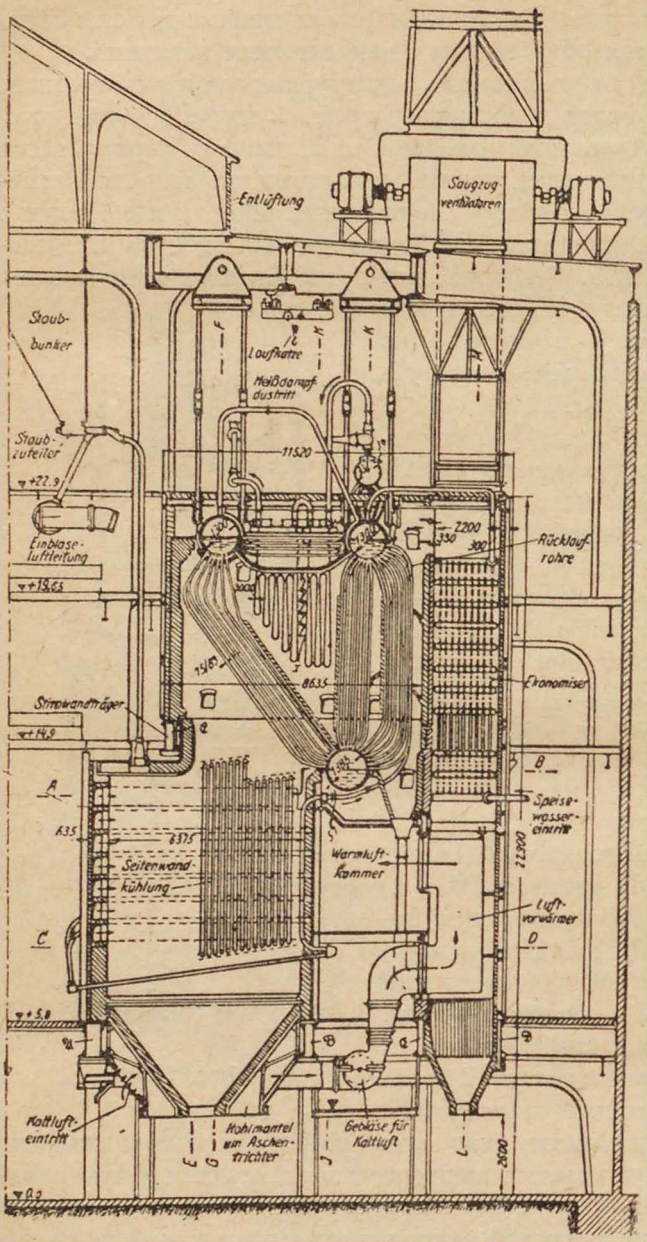
Остановимся сперва на новейших водотрубных котлах высокого давления. В них применяются в настоящее время 2 типа: 1-барабанный секциональный новейшей системы Бабкока и Вилькокса (применяется на многих новейших американских центральных станциях) и вертикально-водотрубные котлы (применяемые и в Соединенных Штатах и в Европе). Современный котел типа американской конструкции Бабкока и Вилькокса изображен на фиг. 204. Немецкий тип котла Бабкока и Вилькокса мало отличается от американского. Такие котлы поставлены, например, в числе 4 (из 16, остальные 12 — вертикально-водотрубные) на станции Клингенберг.



Фиг. 204

В области вертикально-водотрубных котлов высокого давления встречаются еще 4-барабанные котлы, но намечается переход сначала к 3-барабанным котлам и в особенности к 2-барабанным котлам (например, котлы системы Мюнцингера завода «Вс. компании электричества» на той же станции). 3-барабанный котел для станции Клингенберг изображен на фиг. 205 (поверхность нагрева 1750 м², давление — 35 ата и температура пара 410°). 2-барабанные котлы проделали большую эволюцию (как было указано, — далеко незаконченную). Первоначальный тип 2-барабанного котла (Гарбе, построенный на заводе Борзига в 1909 г.) отличался недостаточно хорошей циркуляцией воды, вследствие образования пузырьков пара в трубах, предназначенных для стока охлаждающей воды в точке «*a*» — фиг. 206. После ряда усовершенствований в системе циркуляции получился тип 2-барабанного котла, изображенный на фиг. 207. В нем трубы для движения вниз воды помещены в сравнительно холодном месте и циркуляция не подвергается опасности быть нарушенной пузырьками пара. С другой стороны, трубы переднего ряда, служащие для подачи сильно нагретой воды и пара в котел, выведены высоко и не подвергаются действию колеблющегося уровня воды. Котлы этого типа исполняются заводами Борзига, Аугсбург-Нюрнберг [1] (MAN) и другими. Впрочем, возникают постоянно и другие типы вертикально-водотрубных котлов, и в Германии часто раздаются жалобы на слишком большое количество их типов и слишком частую смену этих типов.

[1] Который продолжает, впрочем, строить и 3-барабанные котлы.



Фиг. 205

Так, Бренер приводит [1] характерный факт, касающийся одной из немецких котельных фабрик, которая в последние годы переменила 10 конструкций водотрубных котлов с горизонтальными трубами и 14 с вертикальными трубами; вообще же, по его словам, в Германии за последние 4 года испробовано до 240 систем котлов.

Особые типы котлов

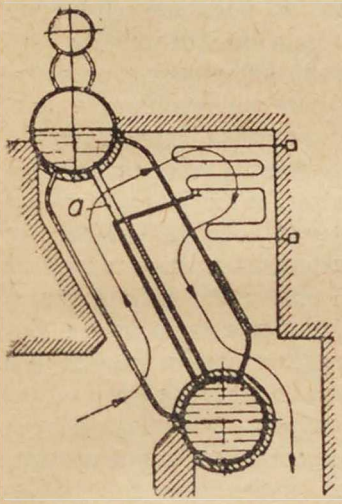
Из котлов высокого давления специального типа мы остановимся только на 3 типах — котлах Шмидта, Леффлера и Бенсона.

Котел системы Шмидта является по времени появления первым из котлов высокого давления специальной конструкции. Схема его в исполнении «Общества для применения пара высокого давления» по способу В. Шмидта и паровозного завода Геншель, применительно к паровозу высокого давления, изображена на фиг. 208.

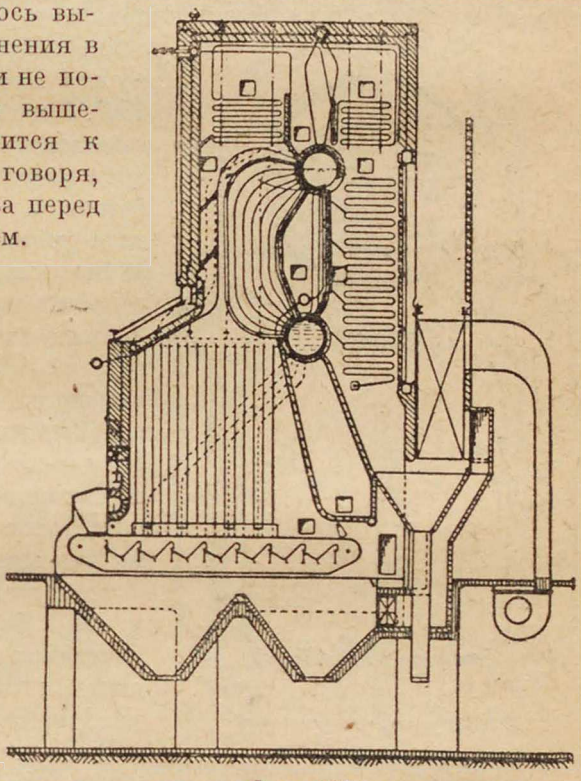
Котел высокого давления (h) защищен от непосредственного действия пламени. Для этой защиты служат восходящие трубы (по которым вода подымается), образующие решетку, на которую может быть помещена огнеупорная заслонка, прикрывающая ко-

[1] Die Wärme, № 10, 1932.

тел h. В котле h испарение происходит за счет теплоты пара, проходящего через нагревательные элементы f. В эти нагревательные элементы пар попадает по подземным трубам a, конденсированный же после отдачи тепла пар возвращается по трубам b и b_1 в нижние сборники для воды C, лежащие ниже топливной решетки и потому холодные. Такое расположение труб имеет целью создать правильную и интенсивную циркуляцию воды. Котлы системы Шмидта применены были не без успеха (судя по результатам опытов) в германских паровозах высокого давления, о которых говорилось выше. Но крупного распространения в стационарных установках они не получили. Мюнцингер в своей вышецитированной статье относится к котлу Шмидта отрицательно, говоря, что он не имеет преимущества перед котлами обыкновенных систем.



Фиг. 206



Фиг. 207

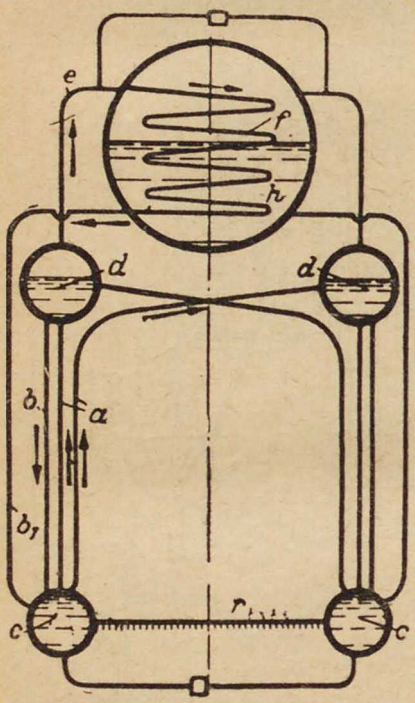
Схема котла Леффлера изображена на фиг. 209.

В котле этом циркуляция искусственная, вызываемая действием насосов p и s. Самый котел «K» не подвергается действию горячих газов; в котле этом первоначально создается невысокое давление посредством вспомогательного котла. Затем вспомогательный котел отделяется и пар из котла «K» отсасывается насосом p и подается в перегреватель u, где подвергается непосредственному действию горячих газов. Этот высоко перегретый пар возвращается в котел «K», испаряет там новое количество воды и подымает давление пара.

Повторяя этот процесс можно довести давление пара до нужной высоты и после перегрева в перегревателях u можно пустить часть его в машину (по трубе b).

Котлы Леффлера испытаны на некоторых установках довольно длительное время и заслуживают во всяком случае большого внимания и применения при особенно высоких давлениях.

Котел Бенсона представляет самое крупное отличие от котлов нормальной системы. В нем совсем нет барабана. Вода сжимается до критического давления воды (224,2 ата) при помощи турбонасоса, прокачивается последним через обогревательное пространство котла, где и переходит непосредственно в парообразное состояние, и затем полученный пар подвергается торможению с понижением давления до 100 ата (причем температура повышается до 311°), поэтому пар приходится вновь перегревать до 400°. После этого пар работает в части высокого давления турбины, а затем подвергается вторичному перегреву и работает в части низкого давления. По идее устройство котла Бенсона чрезвычайно остроумно, но большое сомнение вызывал вопрос надежности работы различных элементов, входящих в этот котел, не было также уверенности в правильности питания котла (являющегося необходимым условием надежности работы котла Бенсона, в виду отсутствия в нем всякого водяного резерва). Поэтому котел этот подвергался многочисленным испытаниям, сначала в Регби (в Англии) у изобретателя, а затем на заводах Сименса в Берлине (которые и являются в настоящее время главными пропагандистами этой системы котлов). Котел Бенсона для отопления угольной пылью, поставленный на кабельном заводе Сименса, представлен на фиг. 210.

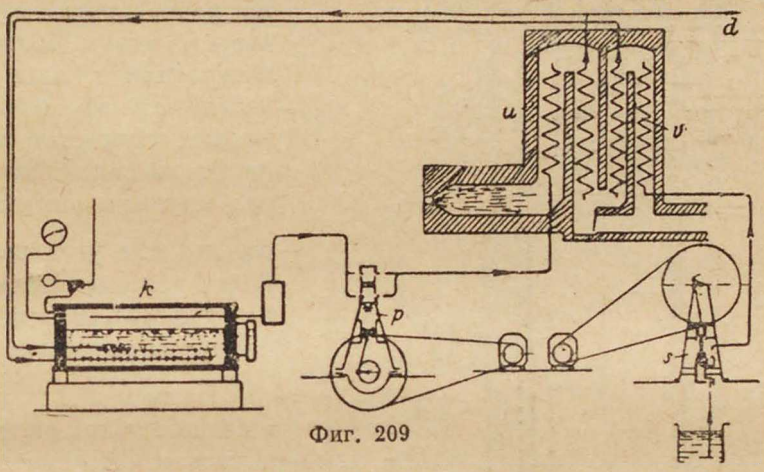


Фиг. 208

Паропроизводительность этого котла — 35 т/час; затем был поставлен котел с производительностью 45 т/час. Опыты с этими котлами дали вполне удовлетворительные результаты, после чего той же фирмой Сименс произведена крупная промышленная установка для бельгийской станции в Лангербрюгге. Котел там должен производить 100 т/час при критическом давлении и температуре перегрева в 450°. Пар работает в паровой турбине (завода Броун-Бовери) мощностью в 25 000 квт при давлении в 160 ата. Результаты работы этой станции вызывают, конечно, большой интерес. [1] Наконец, мы упоминали уже о новом типе котла «Велокс», предлагаемом заводом Броун-Бовери, который обещает произвести крупный переворот в котельном деле.

[1] Новейшие сведения о котле Бенсона имеются в статье Gleichmann «Neues vom Benzonkessel», Arch. f. Wärmewirtsch., стр. 143, 1933.

О котле «Велокс» существует сейчас целая литература. [1] Идея, положенная в основание его конструкции, есть усиление теплопередачи от горячих газов через стенки котла к воде помощью крайнего повышения скорости движения этих газов: вместо обычной скорости в 10—15 м/сек. для этих газов в котле «Велокс» принята скорость в 200—300 м/сек. Эта скорость достигается применением сильного вентилятора, приводимого в движение газовой турбиной, работающей на отходящих газах топки. Эта огромная скорость продуктов сгорания и вызванная ею повышенная теплопередача в котле дают огромный съем пара с одного м^2 поверхности нагрева. Так, в опытах Квиби (приведенных в той же статье Lennig) получились следующие данные: при испытании котла на 32 т/час при давлении в 16 ата, температуре пара в 331° и температуре питательной



Фиг. 209

воды, равной 57°, получилось испарение в 460 кг на 1 м^2 поверхности нагрева; коэффициент полезного действия котла получился равным 0,91.

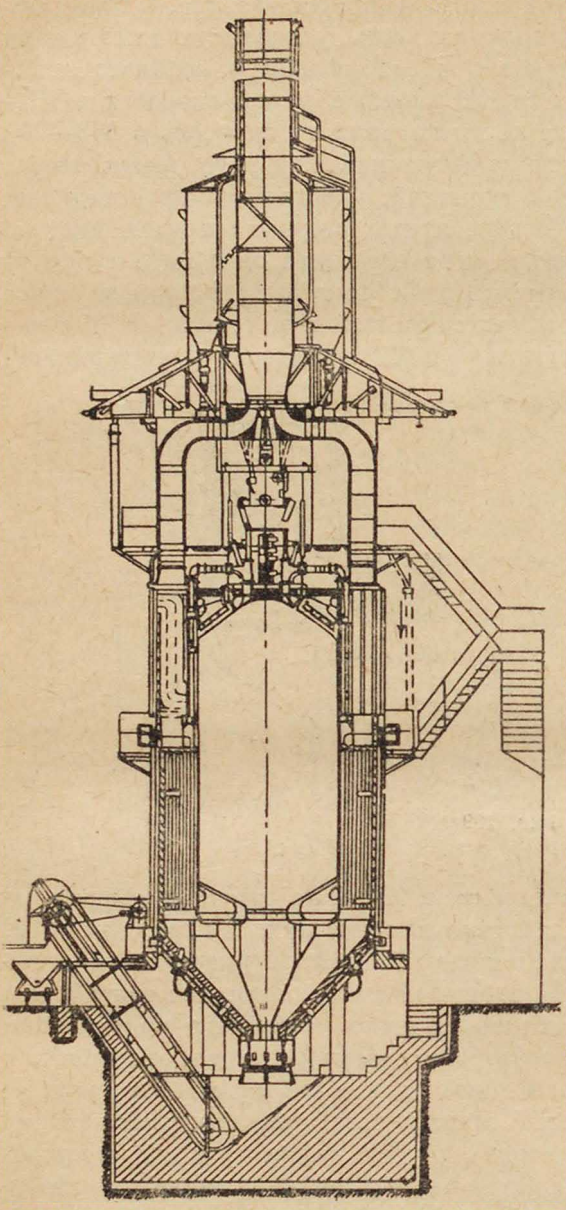
В другом опыте с котлом на 10 т/час (28 ата, 380°) получилось испарение в 500 кг/м^2 при коэффициенте полезного действия, равном 0,9. Эта огромная производительность котлов «Велокс» позволяет чрезвычайно уменьшить как размеры, так и вес, что может иметь особенное значение для судовых установок: вес котлов «Велокс» получается значительно меньше веса нормальных судовых котлов. [2] Наряду с вышеупомянутыми котлами в новейшее время появилось еще много других, например, котлы с принудительной циркуляцией Ла Монт, котлы с одной трубой тоже с принудительной циркуляцией Зульцера.[3] Есть еще целый ряд других конструкций:

---

[1] См. новейшие статьи: L e n n i g, Arch. f. Wärmewirtsch., № 2, 1934 г., D e l o n g u e, Le générateur de vapeur «Velox» système Brown-Boweri, Génie Civil, 2 е полугодие 1934 г.

[2] Соображения по этому поводу имеются в статье М. В а й с м а н «Характерные особенности паропроизводителя «Велокс». Сборник Научно-иссл. инст. воен. корабл., № 3, 1934.

[3] A. S t o d o l a. Der Sulzer Einrohr Dampferzeuger. Z. d. VDI, № 46, 1933.



Фиг. 210

Мюнцингера, Форкауфа (котел, приводимый в движение паровой турбиной), Целли, Добля (котел на 120 ата для парового автомобиля) [1] и др. Обо всех этих котлах имеется очень мало сведений; некоторые из них (например, котел Форкауфа) существуют только в виде проекта. Самое количество этих особых конструкций и их разнообразие свидетельствует, что в области котлостроения период исканий далеко не закончен и что можно ожидать в этой области еще дальнейшего периода крупных изменений.

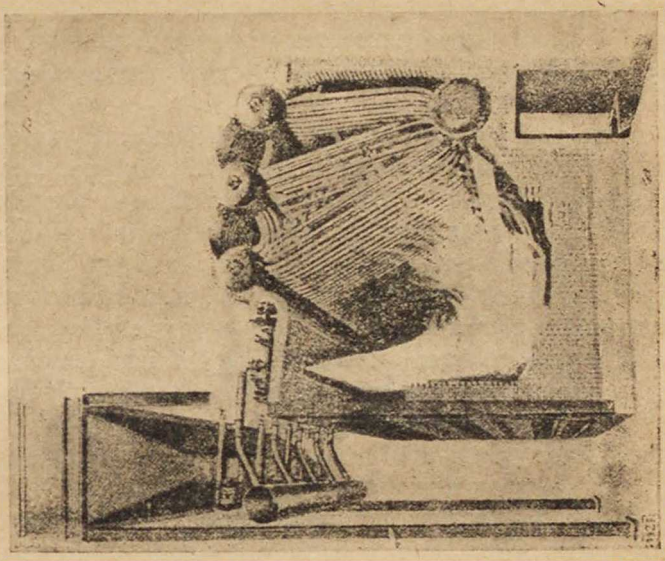
Применение угольной пыли. Топки для специальных сортов топлива. Различные вопросы котлостроения

Применение угольной пыли в больших размерах началось в САШ после войны и сделало там в короткое время крупные успехи. Затем угольная пыль начала применяться все в больших размерах на европейских станциях, особенно в Германии. Применение угольной пыли вызвало большие изменения в конструкции самих котлов; в последние годы замечается стремление объединить конструкцию топок для угольной пыли и самого котла, сделав их наиболее приспособленными друг к другу. Главною областью применения пылевидного топлива являются крупные котлы центральных

[1] Краткие сведения об этих котлах имеются в вышеприведенной статье Lennig. Новейшие сведения о котле La Mont имеются в статье Vorkauf, Die Wärme, № 9,1935 г. Опыты A. Stodola с котлами «Velox» описаны в Z. d. VDI, № 4, 1935.

электрических станций. При котлах самой крупной производительности применение других способов сжигания топлива (механические решетки и стокеры) делается почти невозможным; Мюнцингер считает, [1] что для получения пара в одном котле в количестве более 150 — 200 т/час пылеугольные топки являются единственно пригодными, но что имеются примеры применения угольной пыли и в установках малых размеров и даже в специальных установках, таких как паровозы и пароходы. [2]

Техника сжигания пылевидного топлива в настоящее время чрезвычайно разработана и в настоящем кратком очерке ее невозможно даже коснуться. Она обнимает ряд операций: дробление и сортировку угля, помол и транспорт угольной пыли, подачу ее в топку, конструкцию топок и их эксплоатацию, причем и самая конструкция котла тоже должна быть приспособлена к особенностям пылевидного топлива. Топка имеет большой объем, и пламя направляется часто сначала вниз для создания турбулентного движения и лучшего перемешивания, а затем поворачивается и идет вверх, где смешивается с добавочным воздухом. Пример такой топки показан на фиг. 211.



Фиг. 211]

Топка для пылевидного топлива окружается охлаждающей решеткой (водяным экраном), являющейся важной частью поверхности нагрева котла. Интенсивность горения и теплопередачи чрезвычайно велика, количество избыточного воздуха очень невелико. Подаваемый воздух нагревается до высокой температуры (порядка 300°). Пример распределения поверхностей в котлах с пылеугольным отоплением дает, например, котел Бабкока и Вилькокса в 781 м² поверхности нагрева на станции Колумет.

---

[1] Münzinger, Z. d. VDI, № 17, 1931.

[2] Кроме паровых котлов пылеугольное отопление нашло широкое применение разных отраслях химической и металлургической промышленности.

Поверхность нагрева собственного котла	552 м²
Поверхность охладительной решетки топочного пространства	229 »
Пароперегреватель	279 »
Экономайзер	823 »
Воздушный подогреватель	3 880 »

Котлы с пылеугольным отоплением и водяным экраном отличаются чрезвычайной паропроизводительностью и высоким коэффициентом полезного действия. Так, например, котел Cambridge Engineering C-ie [1] дает 214 кг/м² поверхности нагрева и имеет коэффициент полезного действия равный 0,88. При этом напряжение камеры горения получается равным нормально 300 000 кал/м³, доходя по временам даже до 440 000 кал/м³.

В связи с подогревом питательной воды паром, отведенным из паровых турбин, возник вопрос о воздушных подогревателях (воздушных экономайзерах).

Из конструкций воздушных экономайзеров следует отдельно упомянуть о воздушном экономайзере Юнгстрема, построенном по регенеративному принципу. В нем имеется медленно вращающийся ротор (14 — 6 об/мин.), состоящий из ряда камер с нагревательными элементами. Топочные газы проходят через пластинки ротора и отдают им тепло, затем уходят в трубку, воздух же высасывается вентилятором и прогоняется через каналы ротора, заимствуя тепло от гофрированных листов ротора. Подогреватели Юнгстрема отличаются малым объемом и хорошим действием, почему и получили большое распространение.

Пылевидное топливо стоит сейчас в центре технического интереса котельных установок. Но и топки для других видов топлива сделали за последнее десятилетие чрезвычайные успехи.

Так, имеется два крупных класса топок, главным образом для каменного угля, — это цепные решетки с непрерывным движением и топки с механической нижней подачей топлива; последние получили особенное развитие в Америке.

Крупное развитие получили также топки для сжигания разнообразных видов низкосортного топлива. Этот вопрос имеет особенное значение для СССР с ее богатыми ресурсами самых разнообразных топлив; кроме антрацита (удобнее всего сжигаемого в пылевидном состоянии), каменного и бурого угля (могущих быть сжигаемыми и на механических топках и в пылевидном состоянии), в разных районах имеются богатейшие запасы низкосортных топлив: торф, дрова, сланцы, шунгит, отбросы разных производств. Таким образом, перед советскими теплотехниками стояла крайне сложная задача конструкции топок для рационального сжигания этих топлив и имеется ряд решений этой задачи, приобревших большую известно и распространение: топка Т. Ф. Макарьева для торфа, топки Силь-

[1] Данные эти заимствованы из книги Г. Блейбтрей «Пылеугольное отопление», 2-е изд., Гострансиздат, 1931 г. Аналогичные данные приводятся у Мюнцингера «Котельные установки больших силовых станций», Киев, 1929.

ницкого для сырых дров и влажного торфа, различные топки, разработанные Всесоюзным теплотехническим институтом, топки инж. Ковальского, А. А. Шершнева и др.

Переход к крупным котлам с высоким давлением и высокой температурой производимого пара потребовал глубоких изменений во всей прочей конструкции котлов: выработаны конструкции перегревателей с употреблением для них, в случае особенно высоких температур, специальных сталей, [1] для особенно высоких давлений разработаны методы и приемы промежуточного перегрева, введены механические приемы подачи горючего из складов (или вагонов) в топки и способы механического удаления золы и шлаков. Применяется также повсюду в крупных котельных искусственная тяга. В последние годы разрабатываются приемы автоматического управления горением и подачи воды в котел. [2] Все эти мероприятия чрезвычайно упростили уход за котельной и сократили количество занятых в ней кочегаров и рабочих. Наконец, крупнейшие успехи сделаны в области водоподготовки (химическая и термическая очистка добавочной воды, подогрев конденсата), контроля за работой котельной (автоматические контрольные приборы), конструкции самого каркаса котла и способов подвешивания его. Сколько-нибудь детальная характеристика этих успехов котлостроения потребовала бы специального сочинения.

Упомянем только еще об одном вопросе технологического характера, имеющем чрезвычайно важное значение для котельного дела. Это — о замене клепальных работ при изготовлении котлов сварочными. Применение сварки производит вообще большой переворот в машиностроении, так как многие литые чугунные и железные клепанные конструкции заменяются сварными. Сюда принадлежат, например, кожуха конденсаторов, клепанные железные конструкции для строительных и мостовых ферм, многие части судов и т. п. [3] В паровых котлах сварка нашла применение в производстве сварных барабанов в котлах высокого давления, а затем начинает вытеснять клепальные работы и из других областей их применения в котельном деле. Первоначальное недоверие к применению сварки в паровых котлах исчезает по мере усовершенствования методов сварки и выработки надежных приемов испытания прочности сварочных швов.

Котлостроение в СССР

Мы говорили уже о распыленности производства паровых котлов в дореволюционной России и о недостаточной специализированности

[1] Так например, на станции Делрей, где в последних опытах температура доводилась до 594°, перегреватель состоит из 3 частей; верхней — из обыкновенной углеродистой стали и 2 нижних (которых температура все повышается) из хромистой стали.

[2] Довольно полный обзор вопроса об автоматическом регулировании горения дан в № 3 журнала «За овладение техникой», март 1932.

[3] Много примеров сварочных железных конструкций помещено в Трудах сварочной комиссии при Ленинградском объединении научно-технического совета, вып. 3, Ленинград, 1932.

этого производства. В настоящее время имеется ряд заводов для постройки паровых котлов вполне специализированных [1] (Ленинградский металлический завод им. Сталина, завод им. Ленина, Таганрогский завод, Луганский завод и др.).

Типы производимых котлов стандартизированы. Котлы системы Шухова, горизонтальные, исполняются для давлений в 15 ата и идут от малой поверхности нагрева в 62,5 м² до 310 м².

Из крупных котлов для электрических станций строятся секциональные котлы типа Бабкок и Вилькокс с продольным барабаном на поверхности нагрева в 250 м² (6—8 т/час.) и 400 м² (12—16 т/час.) для давлений 15 ата и температуре в 375—400°. Затем имеются типы секциональных же котлов Бабкока и Вилькокса с поперечным барабаном (снимаемые с производства в 1934—1935 г.).

Далее идет большое количество вертикально-водотрубных котлов 3-барабанных и 2-барабанных.

Таблица 11

Котлы	Пов. нагр.	Давл. ата	Темпер. °С	Схема м²
Трехбарабанные				
1	2 500[1]	34	425	135—160
2	2 500	34	425	150—180
3	1 600	32	425	75— 90
4	1 500	32	425	90—100
5	1 250	30,5	400—425	60— 75
6	800	32	425	40— 48
7	650	32	425	40— 48
Двухбарабанные				
8	500	17 и 22	375	20— 25
9	450	17 и 22	375—400	20— 25
10	400	17 и 22	350—400	14— 18

С 1934—1935 г. вводится постройка новых типов мощного 2-барабанного вертикально-водотрубного котла на 120—150 т/час. на давление в 32 ата и температуру в 424°С для съема 125—150 т пара в час и горизонтально-водотрубного котла на 160- 200 т пара в час, на давление в 32 ата и при температуре в 425°. [2]

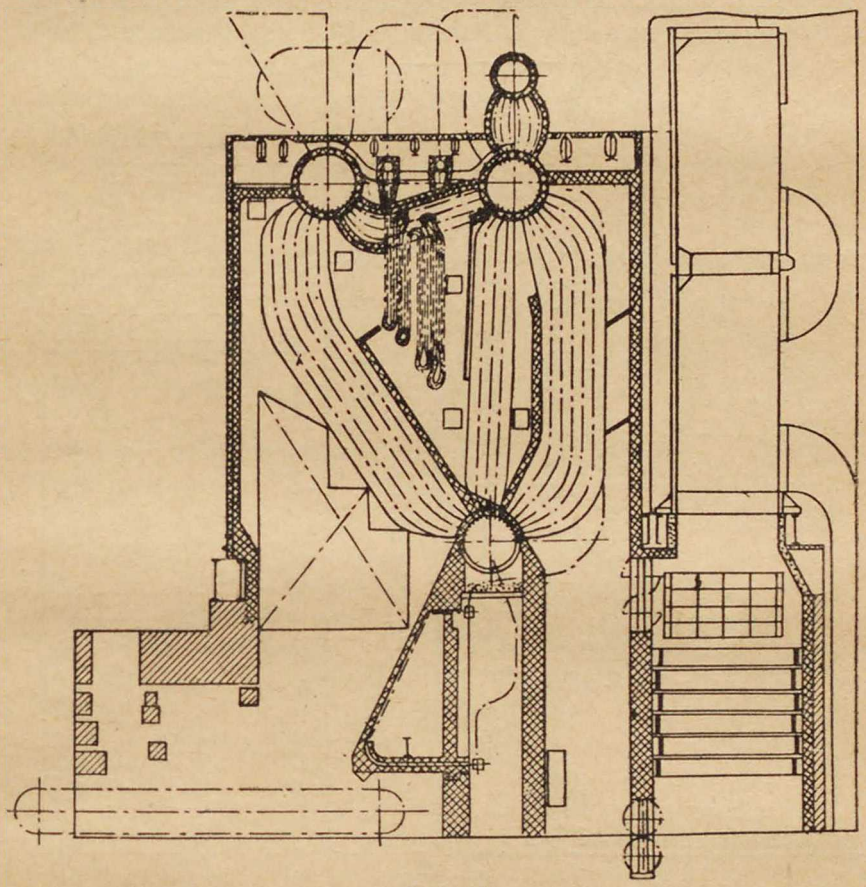
Все параметры этих котлов совершенно современные и сами котлы размерами не уступают размерам германских и американских котлов. Котлостроение в СССР вызывает к себе интерес и за границей, о чем свиде-

[1] Котлы этого типа поставлены на Дубровской станции.

[2] Наиболее полным источником сведений по новейшим котлам, строящимся в СССР, является сборник «Энергооборудование СССР», вып. 2, Энергоиздат, 1934.

тельствует появление статей, посвященных советскому котлостроению в немецком специальном журнале. [1]

Из специальных типов следует упомянуть о котле на 120 ата, спроектированном для Московско-Нарвской ТЭЦ в Ленинграде и намеченном для исполнения на Ленинградском металлическом заводе им. Сталина и об однотрубном котле проф. Л. К. Рамзина. [2]



Фиг. 212

Котел 3-барабанного типа Ленинградского металлического завода с поверхностью нагрева, равной 2 500 м² и производительностью в 160 т/час., изображен на фиг. 212.

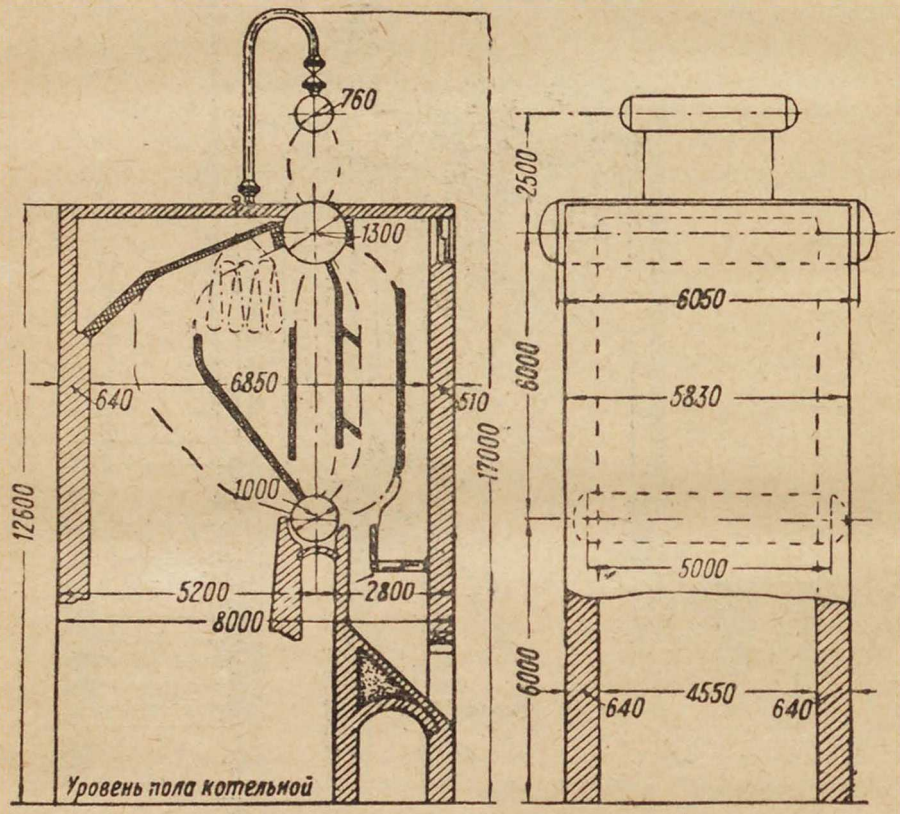
Котел 2-барабанный того же завода с поверхностью нагрева, равной 450 м² и производительностью 20 т/час., изображен на фиг. 213.

[1] Der Dampfkesselbau in USSR, Arch. f. Wärmewirtsch., № 9, 1934.

[2] Крайне благоприятный отзыв специальной экспертной комиссии был опубликован в августе 1935 г. Котлы эти намечены к производству в ближайшее время. Опубликованное краткое заключение заставляет с крайним интересом ждать более подробных сообщений об этом котле.

Научно-исследовательская работа в области котлостроения

Характеризованные в предыдущем обзоре успехи котлостроения не могли бы быть достигнуты, если бы не была совершена большая научно-исследовательская работа. Так, кроме исследования свойств паров высокого давления и температуры (о которых говорится дальше), необходимо было выяснить многие вопросы, касающиеся горения в топках паровых котлов. Сюда относятся работы Розина и Фелинга о зависимости между



Фиг. 213

объемом продуктов сгорания, количеством воздуха для сгорания и низшей теплотворной способностью топлива. Большое значение имеют также работы Оствальда, Аболина и Преториуса над неполным сгоранием топлива. Применение угольной пыли с одной стороны и переход к сжиганию низкосортных топлив с другой вызвали появление чрезвычайно многочисленных специальных исследований, как в заграничной, так и в советской литературе. [1]

[1] Литература эта так обширна, что приходится отослать читателя к специальным литературным указателям, имеющимся в книге проф. М. Г. Окнова «Топливо», 4-е изд., Научно-техн. изд., 1934 г. и проф. Д. Чернобаева «Топливо», Гостехиздат Украины, 1931.

Одной из главных данных при расчетах, касающихся сгорания, является теплоемкость продуктов сгорания (и вообще теплоемкость газов). В последние годы по этим вопросам произведено большое количество исследований физиками и химиками, до известной степени выяснившими сложную зависимость этих теплоемкостей от температуры. Сюда относятся работы Пира, Бьеррум, Партингтона и Шиллинга и др. Сводка этих работ сделана была проф. Бачинским. [1] Выяснилась связь теплоемкостей с вопросами диссоциации продуктов сгорания (Шюле, П. А. Петров), [2] а также с величиной низшей теплотворной способности (Розин и Фелинг).

Другой областью исследования, чрезвычайно важной для расчета котла, являются вопросы теплопередачи. Долгое время они разбирались чисто эмпирически, причем получались крайне противоречивые данные, не дававшие прочных оснований для расчета паровых котлов и в расчете этом господствовал тоже чистый эмпиризм. Начало научному изучению вопросов теплопередачи положили О. Рейнольдс, нашедший связь между явлением теплопередачи и турбулентным движением жидкостей или газов.

Идеи Рейнольдса были развиты в Англии — Стентоном, в Германии — Нуссельтом, Гребером, Тен-Бошем, Меркелем, Шаком и целым рядом других ученых. Таким образом возникло крупное научное движение, отразившееся и на расчете паровых котлов. При коренном и быстром изменении типов паровых котлов прежние способы расчета, основанные на применении эмпирических зависимостей между элементами котла, сделались вообще неприменимыми, и в области этой сделалось совершенно необходимым соединение практики и теории, оказавшееся плодотворным и в других областях техники. Вопрос усложнялся еще важным значением, которое получила в новейшее время передача тепла в топке помощью прямого лучеиспускания от раскаленных газов. В вопросе этом большое значение получило применение закона Стефан-Больцмана, для которого тоже за последние годы найдены были многие важные экспериментальные данные.

Таким образом накопился обширный теоретический материал, который был применен с успехом к расчету паровых котлов рядом американских ученых (Бейли, Бройдо, Гослом и Геттел и др.) и в Германии —Мюнцингером. Книга последнего [3] является крупным шагом вперед в деле рационального расчета поверхности нагрева котла и составных частей этой поверхности, а также и в других вопросов, касающихся теплового расчета парового котла.

---

[1] Изв. Теплотехн. инст., № 2 (45), 1929 г.

[2] Ш ю л е. Новые таблицы и диаграммы для технических топочных газов. В книге этой помещено и самостоятельное исследование инж. П. А. Петрова.

[3] Русск. пер. Ф. М ю н ц и н г е р, «Тепловой расчет и рабочие процессы водотрубных котлов», Научно-техн. изд., 1931 г. В этом же направлении составлена работа Ю. Р у б и н о в а «К проектированию котельных агрегатов», Энергоиздат, 1932.

Надо заметить, что в СССР вопрос о рациональном расчете парового котла был поставлен еще в старые годы В. И. Гриневецким и с тех пор создалась большая советская литература по методам теплового расчета парового котла (М. В. Кирпичев, В. Н. Шретер, А. А. Надежин и др.). Работы по теплопередаче тоже с успехом производились в Ленинградском теплотехническом институте; таким образом, для дальнейшей разработки вопросов, связанных с тепловым расчетом котла, у нас имеется крайне благоприятная почва. [1]

Циркуляция воды в паровых котлах. Уже создание старых водотрубных котлов с горизонтальными трубами было вызвано стремлением улучшить циркуляцию воды в паровых котлах и тем повысить интенсивность парообразования в них. Но особенно остро вопросы циркуляции в паровых котлах стали в новейшее время, когда в такой крайней степени повысилось парообразование в паровых котлах, что заставило перейти к созданию котлов с вертикальными трубами. Одним из первых начал работу по изучению циркуляции воды в паровых котлах Мюнцингер, но с тех пор движение в сторону этого изучения продолжает развиваться, приобретая все большую и большую важность в связи с возрастающими требованиями паропроизводительности паровых котлов.

Обзор новейших работ по циркуляции в паровых котлах дан в статье Boese. Neuere Arbeiten über den Wasserumlauf in Wasserrohrkesseln. Arch. f. Wärmewirtsch., N 4, 1932.

Расчеты котлов на прочность. До недавнего времени и в этой области господствовал крайний консерватизм и в расчетах с натяжками применялись «Гамбургские и Вюрцбургские нормы», составленные еще в 80-х годах прошлого столетия и совершенно не соответствовавшие ни теперешним материалам, ни условиям работы современных паровых котлов. Однако, с расширением применения высокого давления, следовать старым правилам сделалось невозможным и во всех странах началось создание новых норм и новых методов расчета; такие новые нормы появились в Германии, Америке и других странах.

В СССР большое количество норм для котлов разных систем, их материалов и составных частей выработано комиссиями при Всесоюзных теплотехнических съездах (Междуведомственной комиссией по котлостроению; подкомиссией по конструкции и расчетам паровых котлов; подкомиссией по материалам; подкомиссией по техническим условиям). Специально проект технических условий для котлов высокого давления напечатан в Изв. Теплотехн. инст. № 4 (37), 1928 г. Ценный материал по котлам высокого давления имеется также в труде, изданном Ленинград-

[1] Обзор работ по паровым котлам, произведенных в Ленинградском теплотехническом институте и в ВИТГЭО, дан в статье Г. О. Белецкого «Научно-исследовательская работа в котлотурбинной промышленности за 10 лет». Советское котлотурбостроение, № 3, 1934.

ским объединенным научно-техническим советом «Технические условия на постройку и поставку котлов высокого давления» (Гостехиздат, 1930 г.).

В новейшее время для расчета котлов особенно высокого давления приходится применять все более и более сложные методы теории упругости. Примером такого углубленного метода расчета может служить работа Гуггенбергера (Huggenberger) в сборнике «Festschritf A. Stodola». Zürich, 1932.

Глава III

ПОСЛЕВОЕННОЕ РАЗВИТИЕ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Применение пара высокого давления и перегрева

Движение в пользу применения пара высокого давления в паровых турбинах началось, как мы говорили, после опубликования отчета об опытах В. Шмидта с паровым котлом и паровой машиной, работавшей при 60 ата. Экономические обстоятельства послевоенного времени настоятельно требовали снижения расхода топлива, поэтому крупное повышение давления в паровых установках, осуществленное В. Шмидтом и обещавшее значительные выгоды, обратило на себя большое внимание широких технических кругов и вызвало ряд попыток применения пара высокого давления в паровых турбинах, несмотря на отрицательное отношение некоторых крупных специалистов (например Клингенберга) [1] к этому вопросу.

Одна из первых турбин высокого давления в Западной Европе (1924 г.) была предвключенная турбина («Vorschaltturbine»), построенная заводом Броун-Бовери для станции в Лангербрюгге (Бельгия), где работали до этого турбины при 20 ата. [2] Были поставлены 2 предвключенные турбины общей мощностью в 1675 квт при 8000 оборотов в минуту, действующие через зубчатую передачу на общий генератор с 1500 оборотами в минуту. Давление в этих предключенных турбинах было принято равным 50 ата, температура пара 440—450°. Для избежания трудностей устройства лабиринтного уплотнения турбина (см. фиг. 214) помещалась на весу, на продолженной части вала, идущего от части низкого давления (без уплотнения и внешнего подшипника со стороны высокого давления).

Примером нормальной предвключенной турбины (см. фиг. 215) высокого давления является турбина того же завода Броун-Бовери для станции в Маннгейме (7000 квт, 3000 оборотов в минуту, давление впуска 100 ата, температура 430°, противодавление 18 ата).

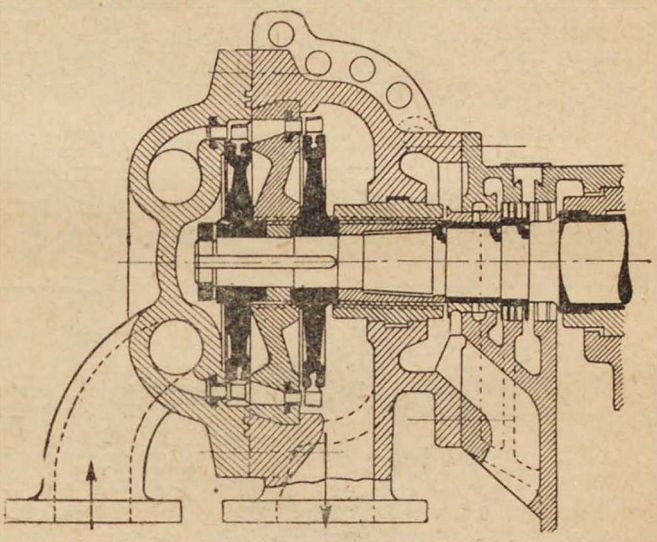
Из других европейских установок высокого давления следует упомянуть об установке в Витковицах (2 турбины: 1-я конденсационная, мощ-

---

[1] Klingenberg, Z. d. VDI, 22 июня 1922 г.

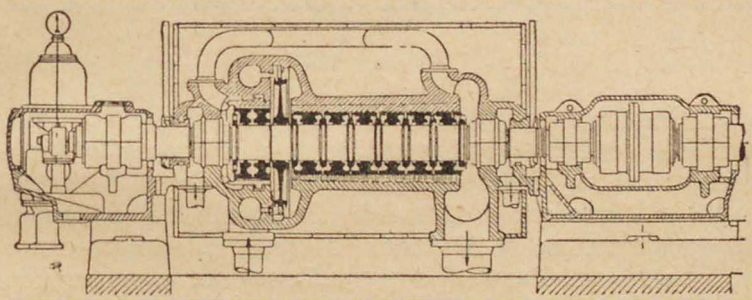
[2] Сведения о новейших паровых турбинах взяты частью из обзора Крафта «Die neuzeitliche Dampfturbine, 2 Aufl., Berlin, 1930 г., частью из новейшей журнальной литературы.

ностью 18 000 квт, при давлении впуска 120 ата, температура 490°, число оборотов 3000, 1-го Брюннского машиностроительного завода, поставленная в 1928 г., и 2-я, тоже конденсационная, мощностью в 30000 квт, при 3000 оборотах, давления впуска 119 ата, температуре 500° — завода Броун—Бовери, поставленная в 1930 г.) и в Лангербрюгге — новая установка 1931 г. (мощность — 4000 квт при давлении впуска 225/200 ата, температуре 450° и числе оборотов, равном 7000, с зубчатой передачей к электрическому генератору), а также в угольной копи «Ильза» (12000 квт, 3000 оборотов, давление впуска 120 ата, температура 470°, завода Всеобщей компании электричества с промежуточным отбором пара). Последняя турбина, 3-цилиндровая, является типичной конструкцией для современных турбин высокого давления.



Фиг. 214

В Соединенных Штатах имеется большое количество турбинных установок высокого давления (преимущественно на 84 ата — станции Эдгар, Калумет, Лексайд Голланд и др). [1]



Фиг. 215

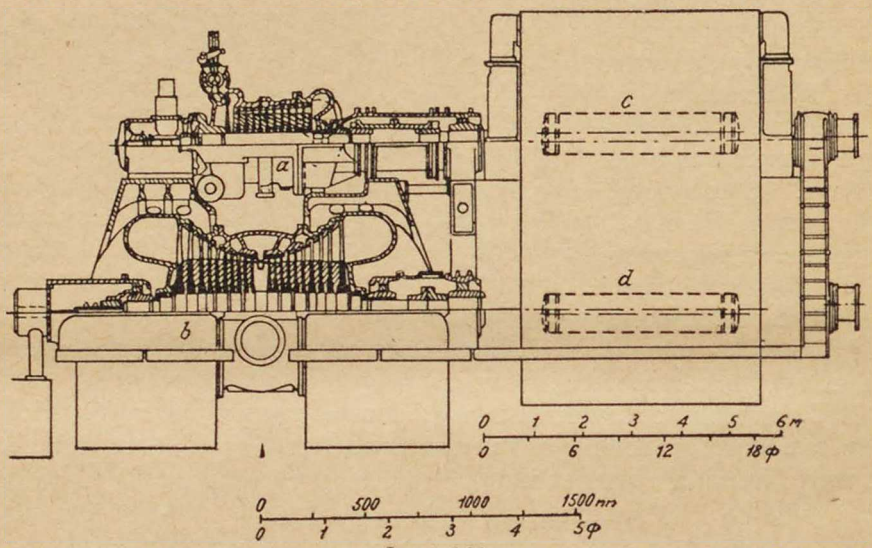
Из американских турбин высокого давления особенной оригинальностью отличается турбина для станции на предприятиях Форда, построенная заводом Дженераль-Электрик. Она 2-цилиндровая и 2-осевая, причем

[1] Сведения об американских станциях высокого давления имеются в статье Т. Ф. Макарьева «Высокое давление и вторичный перегрев на центральных электрических станциях», Электричество, № 15—16, 1929.

цилиндр высокого давления размещен над цилиндром низкого давления (см. фиг. 216).

Эта турбина построена для давления в 84 ата и температуры в 385°. Общая мощность — 110000 квт, распределенная поровну между осями (по 55000 квт), число оборотов — 1800 (в отличие от Европы в Америке применяются в больших трубинах числа оборотов 1800 и 1200, соответствующие числу 60 периодов, принятому для электрических генераторов переменного тока).

Дальнейшее развитие постройки турбин высокого давления сильно задерживается в Европе и Соединенных Штатах экономическим кризисом, но все же главные турбостроительные заводы Соединенных Штатов имеют некоторые заказы на крупные паровые турбины высокого давления.



Фиг. 216

В общем, число паротурбинных установок высокого давления (принимая за высокое давление величины бо́льшие 50 ата) в Соединенных Штатах достигает 20, в Европе же их еще меньшее. Подробный список их (до 1930 г.) имеется в докладе Бауманна на Всемирной энергетической конференции в Берлине в 1930 г. Естественно, что при этом малом числе установок (при том работающих довольно короткое время), многие вопросы, касающиеся паровых турбин, являются нерешенными.[1] Однако, возможное будущее турбины высокого давления (особенно для теплофикационных установок) так велико, что они не могут не привлекать к себе внимания теплотехников, и при планировании турбостроения в СССР на вторую пятилетку намечается постройка большого числа турбин высокого давления.

[1] Очень благоприятные новейшие сведения о работе установки высокого давления на котле «Ильза» имеются в статье Schöne, Z. d. VD1, № 23, 1935.

Мощность и типы современных турбин

Построение турбин больших мощностей с применением в них высокого давления и перегрева повело к крупным изменениям в конструкции и исполнении, к обзору которых мы и переходим.

Наибольшая мощность турбин, быстро возраставшая за последние годы, дошла на станциях Соединенных Штатов до размеров в 160 000 квт (постройка заводов Броун-Бовери и Вестингауза) и 208 000 квт (постройки завода Дженераль-Электрик).

В Европе самые большие построенные турбины имеют мощность 105 000 квт [1] и 80 000 квт завода «Всеобщей компании электричества» для станции Клингенберг, возле Берлина. Вообще же преобладают турбины размером не более 50 000 квт. Влияние кризиса, переживаемого Европой и Соединенными Штатами, сказывается также в уменьшении числа заказов на крупные турбины.

Что касается чисел оборотов, то в Европе принято число 3000 для турбин средней мощности и 1500 для крупных турбин. Мощность, при которой еще применяется число оборотов 3000, все время возрастает, и в настоящее время, как видно из приведенных выше примеров, достигает 50 000 квт (турбины заводов Сименс-Шуккерта, Эрликон, Броун-Бовери для станции Сен-Дени, Метрополитэн-Виккерса). [2] В Америке соответствующие стандартные числа —3600 и 1800. Малые турбины (до 4000 квт) строятся обыкновенно с большим числом оборотов (5000—8000) и зубчатой передачей. Зубчатая передача применяется также для генераторов постоянного тока, так как для них применение числа оборотов больше 1000 представляет затруднения. Это число — 1000 оборотов в минуту, принимается также для турбин, приводящих в движение генераторы для однофазного переменного тока ($16^2/_3$ периода в секунду). Турбины для них делаются с 3000 оборотов в минуту и с зубчатой передачей при передаточном числе 3 : 1. Одна из таких турбин (завода «Всеобщей компании электричества») имеет мощность 15 000 квт. Турбины с зубчатой передачей имеют и другие многочисленные применения, например, в соединении с центробежными насосами (передача 5500/700), соединение с несколькими машинами-орудиями, имеющими разное число оборотов (например, установка завода «Всеобщей компании электричества», с турбиной в 2000 квт при 3000 оборотах, приводящей в движение шлифовальную деревообделочную машину при 240 оборотах и генератор постоянного тока при 750 оборотах). Особенно же важную и большую область турбин с зубчатой передачей составляют (как выше было указано) те судовые установки, о которых мы говорим ниже.

---

[1] Турбина для лондонской станции Battersea, исполненная заводом Метрополитэн-Виккерс, Metr. Vick. Gazette, № 1, 1934 г. (турбина 3-цилиндровая с ц. н д., с двойным протоком пара; число оборотов —1500).

[2] Имеются сведения о турбине в 60 тыс. квт с 3 тыс. оборотов, исполненной на заводе Сименс-Шуккерт (начальное давление 35 атм,, температура 425°, 3 цилиндра, четвертой выпуск), — Z. d. VDI, 1933.

Турбостроение испытало за время своего существования, как мы видели, различные изменения в отношении числа ступеней и выбора скоростей пара. Последние довоенные турбины характеризовались большими скоростями пара, связанными с большими тепловыми перепадами в одной ступени, а, следовательно, с большим числом ступеней.

Однако, в начале 20-х годов наступила реакция против этого типа, инициатором которой явился инженер Брюннского завода — Лезель. Он явился сторонником большого числа ступеней и, следовательно, малых скоростей пара на окружности.

Эти взгляды обосновывались ссылками на опыты английской комиссии по исследованию свойств сопел (Steam Nozzle Research Committee), в которых наиболее высокий коэффициент скорости получился при скорости около 100 м/сек. с резким отличием от довоенных опытов Кристлейна, у которого получилось непрерывное возрастание коэффициента скорости до 6000 м/сек. Однако, вопрос этот нельзя считать вполне выясненным, так как новейшие опыты дают противоречивые результаты.

Так, например, американские опыты дают величину коэффициента скорости, почти не меняющуюся от 100 до 600 м/сек. и только потом начинающуюся быстро уменьшаться. Опыты Флюгеля («Всеобщая компания электричества») дают возрастание от 100 до 600 м/сек. (правда меньшее, чем в опытах Кристлейна). Но небольшие скорости пара имеют другие преимущества, которые тоже дают повышение коэффициента полезного действия.

Так (что особенно важно для турбин с полным подводом пара), при малых скоростях получается большая площадь для прохода пара и, следовательно, большая высота лопаток, что уменьшает процентную потерю через неплотности; кроме того, опыты показывают, что при высоких лопатках получаются вообще меньшие потери, чем при коротких лопатках. Все эти явления особенно резко сказываются при паре высокого давления, почему здесь стали получаться особенно большие числа ступеней, которые, в свою очередь, влекут за собой многоцилиндровые конструкции.

Указанные соображения нашли выражение в численных характеристиках, даваемых турбинам. Таких характеристик применяется две: первая, равная Σzu^2 (сумма квадратов скоростей на окружности) и вторая — характеристика Парсонса, равна $\frac{\Sigma zu^2}{H}$ (сумме квадратов скоростей, деленной на полный тепловой перепад). Для прежних турбин с малым числом ступеней оба эти числа были невелики, тогда как сейчас для них предлагаются гораздо большие значения. Так, например, Л. Рот [1] приводит следующие данные: —

Прежние турбины имели

$\Sigma zu^2 = 300\,000—400\,000$ (и меньше 300 000)

Современные турбины: в одноцилиндровых —

Σzu^2 450 000—600 000 и в многоцилиндровых —

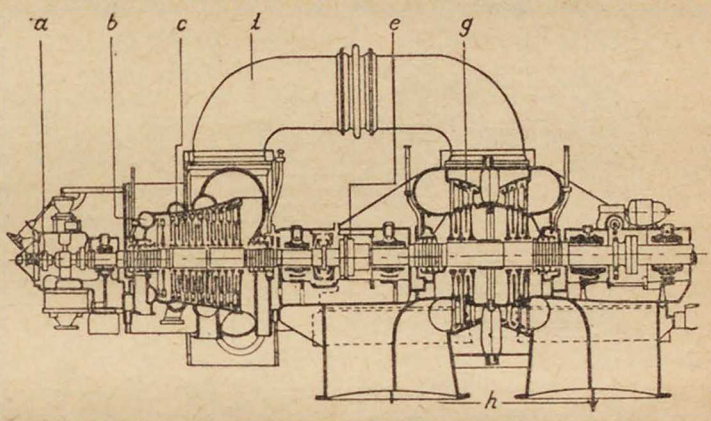
$\Sigma zu^2 = 700\,000—800\,000$.

---

[1] Л. Рот. Паровые турбины, Госиздат, 1930 г.

Число Парсонса для прежних турбин было 1500—1700, в настоящее время для одноцилиндровых турбин — 2 500—2 800 и многоцилиндровых — 2900 и выше.

Крафт приводит данные о построенных турбинах, причем оказывается, что с увеличением числа Парсонса от 1 000 до 3 000 относительный коэффициент полезного действия на валу повышается от 75 до 85—86% (Флюгель [1] дает несколько меньшие цифры). При высоких давлениях в конденсационных турбинах получается больший тепловой перепад, а потому для получения большого числа Парсонса приходится увеличивать число ступеней турбины, почему и получаются турбины с большим числом ступеней. Однако, в новейшее время замечается некоторая реакция против чрезмерного увеличения ступеней, особенно в турбинах высокого давления, а также и против чрезмерного увеличения числа Парсонса. Так, в турбине системы Целли завода Эшер-Вис, испытанной Стодола [2] (11 000 квт, $P_1 =$ 14 ата, $t_1 = 380^0$, вакуум около 95—96% = 3000 оборотов) получился относительный эффективный коэффициент полезного действия, равным 81,6%, при числе Парсонса, равном 2071 и $\Sigma zu^2 =$ 492 000. Число ступеней этой турбины равно только 10.



Фиг. 217

Из прочих особенностей в типах современных турбин надо еще отметить частое применение многократного выпуска пара (двойного и даже тройного и четверного — трубины завода Вумаг). Эта конструкция вызвана стремлением уменьшить длину последних лопаток, которая получается в конденсационных турбинах слишком большой. Надо, впрочем, сказать, что с длиной этих последних лопаток теперь идут гораздо дальше, чем прежде: так, например, в уже упоминавшейся турбине завода «Всеобщей компании электричества» для станции Клингенберг длина последней лопатки равна 610 мм при среднем диаметре последнего колеса, равном 2 840 мм. Такие длинные лопатки делаются переменного сечения, суживающиеся к концу для большего сопротивления центробежным силам и изгибу (и с переменными углами, чтобы учесть разницу в величине окружной скорости в разных точках лопатки).

---

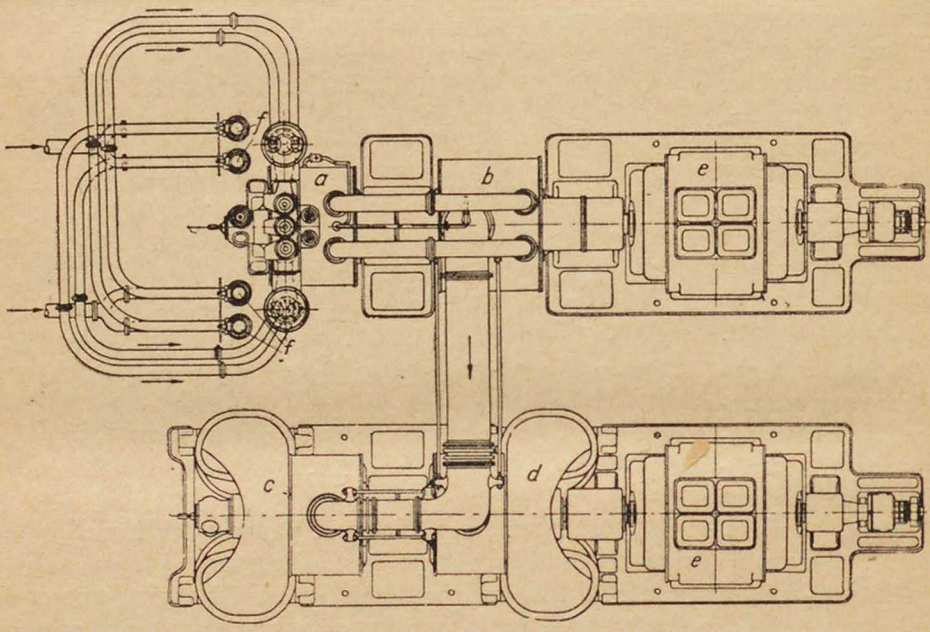
[1] G. Flügel. Dampf- und Gasturbinen, Leipzig, 1931.

[2] A. Stodola. Leistungsversuche an einer 11 000 KW-Zoelly-Dampfturbine, Hochdruckdampf., II, Berlin, 1929.

Приводим одну из типичных конструкций современных турбин завода «Всеобщей компании электричества» мощностью 30 000—50 000 квт: $n = 3000$, 2 цилиндра, цилиндр низкого давления с двойным протоком, по 3 реактивных ступени в каждом (фиг. 217).

Число Парсонса для этой турбины равно 2 100.

Заметим еще, что приведенная комбинация активных колес (с малой степенью реакции — порядка $^1/_{10}$) в части высокого давления турбины и реактивных — в части низкого давления тоже является характерной для современных турбин: применение активных колес в части высокого давления дает возможность получить достаточно длинные лопатки и избежать



Фиг. 218 [1]

сравнительно больших потерь на пропуски; в части же низкого давления реактивные ряды лопаток дают более высокий коэффициент полезного действия и конструктивно лучше выполняются.

Особенно большие турбины выполняются двух- и трехвальные. Примером европейской конструкции 2-вальной турбины является турбина в 80 000 квт, построенная заводом «Всеобщей компании электричества» для станции Клингенберг (Руммельсбург, возле Берлина). Общее расположение валов и цилиндров этой турбины показано на фиг. 218.

В последнее время стремятся, впрочем, переходить к одновальным коструциями и при больших мощностях.

---

[1] a — цилиндр высокого давления, b — цилиндр среднего давления, c и d — цилиндр низкого давления с двойным протоком, e — электрические генераторы.

Из новейших тенденций в конструировании паровых турбин следует отметить возрастающий интерес к радиальным: кроме завода Юнгстрем, продолжающего строить эти турбины, постройку их начал завод МАН, а в новейшее время — и Сименс и Шуккерт.[1]

Способы улучшения термодинамического процесса — промежуточный перегрев и подогрев питательной воды

Как было уже указано, промежуточный перегрев необходим в турбинах высокого давления для уменьшения влажности в ступенях низкого давления. Промежуточный перегрев должен быть введен с таким расчетом, чтобы конечная влажность пара в цилиндре низкого давления не превосходила 6—12%. Промежуточный перегрев можно совершать в таком месте турбины, в котором влажность не превосходит, примерно, этих же значений. Промежуточный перегрев дает сам по себе сравнительно небольшое повышение выгодности теоретической работы паровой турбины, например, для 35 ата не выше 3%, но если принять во внимание уменьшение влажности в конце расширения, то выгода повысится на 7—7,5%. Предлагался также многократный промежуточный перегрев, но выгода, приносимая им, так мала, что не оправдывала расходов и неудобств вследствие усложнения конструкции; поэтому он и не удержался. Промежуточный перегрев может производиться различными способами: 1) посредством отдельно от котла устроенных перегревателей, 2) посредством второго перегревателя, обогреваемого горючими газами самого котла, 3) посредством протекающего свежего пара, 4) посредством конденсируемого свежего пара. Первый из этих способов наименее выгоден и почти не применяется. При промежуточном перегреве по второму способу получается большое загромождение машинного зала трубами, идущими от котельной в зал и обратно, и движение пара по этим длинным паропроводам взад и вперед сопровождается большими потерями. Поэтому в новейшее время перешли к промежуточному перегреву при помощи свежего пара, причем применяют один из двух способов: или пользуются всей массой свежего пара для перегрева перед самой турбиной пара, прошедшего часть высокого давления турбины (3-й способ), или свежий пар идет главной массой в турбину, а часть свежего пара ответвляется и, конденсируясь, идет на промежуточный (4-й способ) перегрев; иногда применяются и комбинации обоих последних способов. В Германии, на станции Маннгейм, применяется именно этот последний комбинированный способ, на станции же в копи Ильза применяется способ конденсации ответвленного пара.

В общем, европейской практикой общепринятой системы промежуточного перегрева еще не выработано, и в Европе к нему относятся с осторожностью: до давления в 60 ата его стараются не применять; пользуются также различными приспособлениями для механического удаления воды

[1] Z. d. VDI, № 36, 1934 г., Die Wärme, № 21, 1934 г., Die Wärme, № 11, 1935 г. Турбина Сименс-Шуккерта — радиальная, но с одним вращающимся диском и одним генератором.

Мы говорили уже о попытках применения регенеративного процесса в паровых машинах. В паровых турбинах он начал осуществляться около 1923—1924 гг., а затем получил чрезвычайно большое применение. Процесс этот состоит в следующем: часть пара, проработавшего в паровой турбине, отводится из одной или нескольких средних ступеней турбины и идет на нагревание конденсата паровой турбины.

Теоретически говоря, наибольшее повышение коэффициента полезного действия получается при заимствовании пара при непрерывно понижающейся температуре из бесконечно большого числа мест. Но практически приходится, конечно, ограничиваться несколькими отборами. При малых турбинах (примерно, до 5 000 квт) вообще не имеет особенной выгоды применение отбора для нагревания воды, при турбинах от 5 000 до 15 000 квт применяют отбор в 2-х местах, свыше 15 000 и до 50 000 квт в трех и четырех местах (большее число отборов редко употребляется, приведенные пределы приблизительны и зависят также от давления).

Устройства с отбором пара для нагревания питательной воды могут отличаться по способу подачи в питательную сеть конденсированного отобранного пара: — могут быть насосы при каждом отдельном подогревателе или подача этого конденсата к основному насосу для конденсата из главного конденсатора, или разделение функций подачи конденсата из подогревателей между главным и вспомогательным насосами.

На величину повышения коэффициента полезного действия паровых турбин оказывает также известное влияние место (т. е. давление отбираемого пара). Вопрос о наивыгоднейшем месте отбора ведет к сложным термодинамическим подсчетам, которые составляют предмет интересных работ некоторых русских исследователей (Я. М. Рубинштейна и Г. И. Петелина).[1] Примерное же указание Крафт дает в таком виде: при однократном отборе место отбора должно соответствовать среднему падению давления в турбине, при нескольких отборах — точки отбора должны помещаться примерно в точках деления перепада давлений на столько же равных частей.

Отбор пара для подогревания воды приносит для турбины тоже косвенные выгоды: при том же количестве пара, проходящем через верхнюю часть турбины, значительно уменьшается количество пара, проходящее через часть низкого давления (процентов на 15 при одиночном отборе, процентов на 30 — при двойном). Это облегчает конструкцию части низкого давления, которая, вообще говоря, как было выше указано, представляет большие затруднения из-за получения слишком большой длины лопаток. Иногда, вместо отбора пара для нагревания питательной воды из главных паровых турбин, на центральной станции пользуются для подогрева конденсата паром из турбины собственных нужд. Такое устройство принято, например, на станции Клингенберг, где для

[1] А. М. Рубинштейн, Изв. Теплотехн. инст., № 1, 1929. — Г. И. Петелин, Регенеративный подогрев питательной воды, Энергоиздат, 1932.

этой цели служит турбина собственных нужд мощностью в 10 000 квт, работающая с противодавлением.

В заключение, о подогреве питательной воды паром, заимствованным от турбины, следует еще заметить, что этот подогрев уменьшает или делает ненужным подогрев помощью отходящих газов в водяных экономайзерах. Чтобы не произошло ухудшения действия котельной установки, необходимо использовать отходящие газы другим способом. Обыкновенно это делается помощью воздушных экономайзеров, о которых мы говорили раньше на стр. 371.

Соединение силового устройства с тепловым

В предыдущих отделах указаны были значительные усовершенствования, сделанные за последние годы в паровых турбинах. Усовершенствования эти далеко еще не закончены и не всегда проводятся полностью в существующих установках. Таким образом, можно ожидать в ближайшем будущем дальнейшего повышения полного экономического коэффициента полезного действия конденсационных паротурбинных установок. Однако, самые оптимистические расчеты приводят к максимальным числам не выше 35—36%: эту цифру дает Кристи,[1] предполагающий, что для турбины, работающей при давлении в 2 500 англ. фун. (175 ата) и температуре в 1 000° Фаренгейта (540° С) может получиться полный расход тепла, равный 9 500 британских термических единиц на квт-час., т. е. 2 394 кал. на квт-час, что соответствует полному экономическому коэффициенту полезного действия, равному $\frac{860 \cdot 100}{2394} = 36\%$.

Этот коэффициент равняется коэффициенту полезного действия хорошего дизельмотора, однако, при нем 64% теплотворной способности топлива являются безвозвратно потерянными. Таким образом, главным средством для более значительного повышения полного экономического коэффициента полезного действия является переход от работы с конденсационными установками к работе с установками с применением отходящего пара для целей нагревания и отопления. Такие паротурбинные установки могут быть исполнены в двух главных видах: как установки с противодавлением и как установки с отбором пара. Наиболее выгодный случай представляют собой, конечно, установки с противодавлением, в которых полная утилизация энергии (электрической и тепловой) может доходить до 80% и даже выше. Но установки с противодавлением требуют полного соответствия между потребностью в паре и электрической энергией. Поэтому установки эти не обладают гибкостью, необходимой во многих случаях, где нет указанного соответствия. В этих случаях применяют установки с отбором пара, что иногда также удобнее, в виду необходимости иметь пар для нагревания двух различных температур;

[1] A. G. Christie. Trends in steam turbine developement. Mechan. Engin., № 2, 1931.

в этом последнем случае ставится турбина с 2 отборами пара или турбина с отбором и противодавлением. Выгодность установок с отбором пара — переменная: смотря по количеству отбираемого пара, она приближается то к установкам с противодавлением, то к установкам конденсационным. В виду значительной экономии, приносимой паровыми установками с утилизацией отходящего тепла, они получили в послевоенное время чрезвычайное развитие, особенно в последние годы, с применением пара высокого давления. В самом деле, высокое давление дает возможность получать большое количество избыточной энергии при очень малом добавочном количестве тепла.

Подсчеты показывают особенную выгодность применения высокого давления в установках с утилизацией отходящего тепла.

Ранее уже был дан ряд примеров турбин с противодавлением и отбором пара высокого давления. Не останавливаясь подробно на их конструкции, заметим только, что одна из главных трудностей их конструирования заключается в надлежащем устройстве регулирования, более сложного для турбин с отбором пара (притом, в особенности, если имеют 2 места отбора или отбор и противодавление); эти трудности надо считать в настоящее время более или менее преодоленными.

Материалы для турбостроения

В довоенных турбинах применялись те же давления и температура, что и в лучших паровых машинах того времени. Поэтому и материалы для изготовления неподвижных турбинных частей были те же, что и в паровых машинах, т. е. чугун для корпусов, обыкновенная мартеновская сталь для диафрагм и т. п. Парсонс применял для лопаток судовых турбин, работавших без перегрева, просто бронзу. Только для дисков приходилось применять никелевую сталь, она же применялась для лопаток турбин, работающих с перегревом.

Высокие давления и температуры, а также большие скорости, применяемые в современных турбинах, ставят чрезвычайно высокие требования к материалу отдельных частей и их изготовлению. Можно сказать, что реализация всех усовершенствований, предлагаемых в паровой турбине, особенно в послевоенном периоде обусловливается в первую очередь подбором соответствующего материала для турбинных частей.

Чугун. Части турбин, находящиеся вне действия пара, могут быть исполняемы из чугуна, при соблюдении обыкновенных требований, предъявляемых к нему в машиностроительной практике. Но применение чугуна в частях, подверженных действию высоких температур (для кожухов, диафрагм и арматуры), встречает затруднения в разных неблагоприятных свойствах чугуна: наклонности давать трещины и в особенности подвергаться так называемому «росту», происходящему от разложения карбида железа на феррит и графит. Процесс этот, раз начавшись, продолжается далее и может привести к полной порче чугуна: чугун начинает затем окисляться и может сделаться совсем пористым.

Вообще же принимается, что высшая температура, при которой может быть применяем чугун, есть 250° при давлении в 20 ата и до 300° при меньших давлениях. Части же, подверженные действию более высоких температур, должны исполняться из стального литья или мартеновской стали. Сталь содержит углерод в связанном состоянии и не имеет свойства «роста». Поэтому она может применяться при высоких температурах. Для стали важным требованием является малый процент фосфора и серы (общее содержание которых не должно быть больше 0,12% и в каждой отдельной из этих частей не более 0,07%). Но при высоких температурах (уже при 500°) сопротивление и предел текучести стали сильно понижаются, почему в новейшее время предлагаются, вместо обыкновенного стального литья и даже мартеновской стали для труб, стали с примесью никеля, никельхрома и молибдена. Для стального литья имеет, кроме состава, также крайне важное значение надлежащая термическая обработка. Прокованная мартеновская сталь имеет разрывающее усилие, равное 60—65 кг/см², предел текучести 35—38 кг/см² и 24% удлинения при 5-кратной длине образца. При более высоких напряжениях (при употреблении для валов, дисков и барабанов) применяют небольшие примеси никеля, никельхрома, причем сопротивление разрыва доходит до 80—90 кг/см², предел текучести — от 65 кг/см² при 15-процентном удлинении.

Для стали играет еще большую роль явление так называемого «крипа» (ползучести — «creep»), обратившее на себя большое внимание в последние годы, особенно с применением высоких температур. Явление это состоит в том, что сталь еще до достижения предела текучести начинает приходить в пластическое состояние и при длительном приложении нагрузки возникающие деформации могут продолжать увеличиваться до разрушения материала. Таким образом, предельные напряжения должны выбираться не по направлениям на текучесть, а по меньшему напряжению, соответствующему состоянию до начала заметного «крипа». Это обстоятельство имеет особенное значение для обыкновенной мартеновской стали, у которой пределы текучести и «крипа» сильно расходятся между собой. Поэтому в такой ответственной части, как кожухи цилиндров высокого давления паровых турбин, приходится применять легированные стали с более высоким пределом начала «крипа». Вопрос этот нуждается, однако, в дальнейшем изучении. [1]

Особенное внимание при выборе материала уделяется лопаткам, как частям, подверженным значительным усилиям, а также склонным к коррозии от действия влажного пара. При высоких температурах в верхних частях турбины применялась, главным образом, никелевая сталь (с 5% никеля) и нержавеющая сталь с малым содержанием никеля и 15% хрома. В новейшее же время рекомендуются сплавы с большим

[1] Современное состояние вопроса о текучести металла изложено в книгах проф. И. А. Одинга «Прочность металлов», Гос. научн.-техн. изд., 1932, § 33 и И. А. Одинга и П. Б. Михайлова-Михеева «Материалы турбин и турбогенераторов», Энергоиздат, 1934, стр. 26 и след.

содержанием никеля (доходящим до 60% при 14% хрома и 6,8% молибдена).

Из этого краткого обзора применяемых в турбостроении материалов видно, какие сложные вопросы приходится решать в этой области в новейшее время.

Конденсационные установки

В области конденсационных установок достигнуты большие успехи. Прежде всего в отношении теплопередачи: вместо прежде рекомендовавшегося передаточного числа порядка 1 500 кал. на м² ч. в хороших современных установках могут быть значения порядка 3 000. Вместо прежнего количества в 25 кг конденсированного пара на 1 м² поверхности охлаждения в час, теперь получается 50 кг и выше. Для достижения таких результатов пришлось сделать большие усовершенствования в самой конструкции конденсаторов: улучшить доступ пара к трубкам конденсатора и уменьшить охлаждение конденсата (конструкция в виде буквы U Броун-Бовери, регенеративные конденсаторы, проходы для пара между трубками в других конструкциях), принять особое расположение трубок (система Жинаба), сделать более удобной очистку трубок конденсатора (система Броун-Бовери для непрерывной работы), охлаждение воздуха и т. п.

Самые методы расчета и поверки поверхности охлаждения конденсатора тоже улучшились; в этом отношении особое значение имеют работы Гефера в Германии, Мартина — в Англии. [1]

В отношении насосов большое применение для отсасывания воздуха получили паровые эжекторы (особенно в Америке, где они вытеснили почти все другие способы). Наконец, во многих случаях, при недостаточном количестве свежей воды, приходится применять искусственное охлаждение охлаждающей воды конденсаторов. Многие из крупных новейших станций построены с такими устройствами (например, станция Гольпа и станция Фортуна II в Германии). В СССР бедностью в воде отличаются многие местности (Донбасс, Средняя Азия), где приходится тоже применять охлаждающие устройства. Устройства эти могут быть 2 типов: градирни и пруды с брызгалками. Первые получили особенное распространение в Германии, вторые — в Америке. У нас применяются те и другие. [2]

---

[1] См. также новейшую статью H. L. Guy и E. V. Winstonley, Metropolitan Vickers Gazette, № 8—9, 1934.

[2] По расчету и конструкции охладительных устройств появился в новейшее время ряд русских исследований: В. А. Макеев, Тепло и Сила, № 10, 1930. — Проф. И. Н. Бутаков. «Охлаждение циркуляционных вод». Вестн. Металлопромышлен., № 11—12, 1930.—А. Н. Арефьев. «Метод расчета башенных охладителей при переменных режимах». Изв. Теплот. Инст., № 2 (62), 1931.—А. А. Радциг. «Бассейны с брызгалками». Бюлл. Гипромеза, № 1—2, 1931.

Паровые турбины, работающие двумя жидкостями

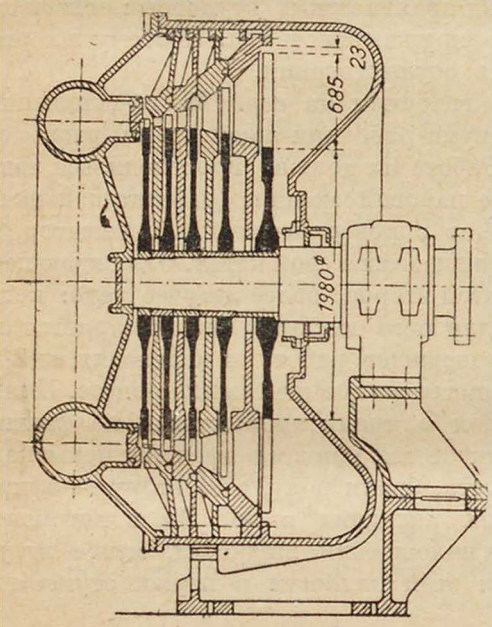
Имеется громадное количество предложений о применении в двигателях паров других жидкостей, кроме воды: еще в 1798 г. известный изобретатель ткацкого станка Картрайт предлагал устройство паровой машины с поверхностным конденсатором, причем как на преимущество этой системы указывал на возможность работать при ней парами алкоголя вместо воды. В XIX столетии предлагались всевозможные летучие жидкости, эфир, аммиак и др. Но эти жидкости не представляли никаких термодинамических преимуществ, или были даже значительно ниже воды в смысле возможности большого термического коэффициента полезного действия, а с другой стороны, имели целый ряд практических неудобств: огнеопасность, летучесть, вред для здоровья окружающих и т. п. Поэтому все эти попытки не получили практического осуществления.

Более успеха имело, как мы говорили на стр. 199, предложение дю-Трембле — устроить машины с двумя рабочими жидкостями, расположенными в порядке их летучести. Работа их должна производиться так, что пары, отработавшие в «верхней» паровой машине (работающей наименее летучей жидкостью), переходят в поверхностный конденсатор, в котором конденсируются сами и возвращаются в свой котел. Охлаждающей жидкостью этого конденсатора является второе, более летучее тело: конденсатор первой машины является для него котлом, оно испаряется и переходит во вторую машину, где совершает работу и переходит во 2-й поверхностный конденсатор, где происходит тот же самый процесс. Были предложения работать таким образом с тремя жидкостями, но фактически работали только с двумя жидкостями, причем в прежних попытках за первую, наименее летучую жидкость, брали воду, а за вторую—эфир, хлороформ, сероуглерод, сернистый ангидрид и др. Но в новейшее время стали заниматься вопросом о нахождении жидкости, менее летучей, чем вода, с целью применения этой жидкости в первой ступени и воды во второй.

Для этой цели предлагалось много органических соединений (анилин, моно-нитро-бензол, различные тяжелые углеводороды, тяжелые отгоны керосина; в новейшее время — дифенил, дифенилоксид и др.); предлагалось тоже применение растворов различных солей (с более высокими температурами испарения), но все эти предложения не нашли покамест практического применения, вследствие разных практических затруднений. Зато большое внимание обратило на себя в последнее время предложение о применении ртути в качестве верхнего тела в машине с двумя жидкостями, причем второй жидкостью является вода; пары обеих жидкостей работают в соответственных турбинах. То же устройство было предложено и осуществлено Эмметом в 1927 г. С тех пор с необыкновенной настойчивостью он продолжает опыты с этими установками (называемыми обыкновенно просто «ртутной турбиной»), исполняемыми во все большем и большем масштабе. Первые опыты производились с турбиной в 1 500 квт, а в 1931 г. построена была опытная установка в 10 000 квт.

Теоретически установка с парами ртути и воды представляется выгодной, так как давление насыщенных паров ртути при высоких температурах невелико (при 374° — критической температуре воды — 1,4 ата, при 400° — 2,2 ата, при 500° — 7,3 ата).

Шюле [1] подсчитывает пример установки, в которой ртуть работает в интервале 400—220° (2,2 ата — 0,044 ата), с легким перегревом (до 450°), а пары воды — при давлении впуска, равном 15,8 ата, с перегревом до 400° и с давлением выпуска, равным 0,043 ата. Если подсчитать работу, даваемую при этом 8 кг ртути (необходимыми для получения работы от 1 кг воды) и работу, производимую 1 кг воды, и затрату тепла, то получается коэффициент полезного действия, равный 0,474.



Фиг. 219

Если принять коэффициент полезного действия котла, перегревателя и конденсатора равным 0,8, а обеих турбин 0,75, то все же получится экономический коэффициент, равный $0{,}447 \times 0{,}8 \times 0{,}75 = 0{,}268$, т. е. весьма значительный.

К этому надо прибавить, что применение ртути именно в паровой турбине особенно удобно, так как вследствие большого удельного веса паров ртути получаются скорости истечения, значительно меньшие, чем для паров воды, а потому турбина может быть устроена проще, чем для паров воды (с меньшим числом ступеней).

Всем этим положительным качествам ртутной турбины противопоставляются ее два отрицательных качества: крайняя ядовитость паров ртути и ее дороговизна. Надо сказать, однако, что за все время работы установок Эммета несчастных случаев не происходило; дороговизна же ртути отразится, главным образом, на стоимости первоначального устройства. Таким образом, возражения эти не являются решающими. Многие американские авторы (например Кристи), [2] основываясь на опыте станции в Гартфорде (с турбиной Эммета), настойчиво рекомендуют иметь в виду систему с двумя жидкостями при проектировании центральных станций. Есть сведения о построенных и установленных ртутных турбинах в

[1] W. Schüle. Technische Thermodynamik, 5-е изд., т. I, ч. 2, § 63, Berlin. 1930.

[2] Цит. статья в Mechan. Engin., № 2, 1931.

в 20 000 квт.[1] Вопрос этот будет решен, очевидно, только дальнейшей практикой.

Разрез ртутной турбины Эммета, мощностью в 1000 квт, представлен на фиг. 219.

Газовая турбина

Как только выяснились преимущества паровой турбины над паровой машиной (что достигнуто было уже в первых годах XX столетия), — был поставлен аналогичный вопрос для газовой турбины и начали появляться сначала теоретические исследования относительно газовой турбины, а затем и практические опыты ее осуществления. Проблема построения газовой турбины представила большие трудности и до настоящего времени не может считаться решенной, продолжает привлекать к себе чрезвычайное внимание теплотехников и не может быть обойдена в обзоре успехов турбостроения. Возможный для газовой турбины процесс и преимущества этого двигателя, а также трудности, возникающие при этом осуществлении, были с большой ясностью охарактеризованы Стодола,[2] слова которого, сказанные в 1923 г., справедливы и для настоящего времени. Заметим при этом, что характеристика, сделанная Стодола, относится к настоящим турбинам внутреннего сгорания, в которых сгорание газовой смеси происходит в самой турбине. От них надо отличать турбины, работающие продуктами сгорания, выходящими из тех или иных поршневых двигателей внутреннего сгорания. Такая турбина была предложена, как мы уже говорили, впервые Рато, с применением ее для повышения зарядки аэропланных двигателей на большой высоте, при разреженном воздухе, а затем исполнялась целым рядом других изобретателей и заводов, преимущественно с той же целью подзарядки двигателей как аэропланных, так и стационарных (дизелей). Особенное внимание обращалось в последние годы на турбину Лоренцена (1928 г.)[3] и Броун-Бовери (1930—1931 гг.).[4]

В настоящей турбине внутреннего сгорания воздух и газ (в случае применения газа как горючего) сжимаются отдельно до более или менее высокого давления, затем сжигаются в какой-либо камере и подводятся к турбине, в которой происходит расширение продуктов сгорания, теоретически говоря, до атмосферного давления.

Такой процесс теоретически одинаков с процессом обыкновенного 4-тактного двигателя, но в последнем практически не доводят расширения до атмосферного давления; таким образом для газовой турбины открывается область возможного усовершенствования. Но, этот практически

---

[1] Обширный материал о ртутной турбине и библиография вопроса имеются в книге инж. Н. И. Дунаевского «Бинарные циклы», Энергоиздат, 1934.

[2] A. Stodola, цит. соч. стр. 769. См. также проф. В. М. Маковский «Опыт исследования турбин внутреннего сгорания». Госиздат Украины, 1925.

[3] Heller, Z. d. VDI, стр. 1869, 1928.

[4] BBC Mitteilungen, № 1, 1932.

более совершенный процесс осуществляется в газовых турбинах с более низким коэффициентом полезного действия, чем менее совершенный процесс в обыкновенном двигателе внутреннего сгорания: использование расширения продуктов сгорания в турбине само по себе получается худшим, чем в поршневых двигателях. Кроме того, работа на сжатие (производимая в газовой турбине, естественно, помощью турбокомпрессора) получается при сравнительно малом коэффициенте полезного действия. Наконец, чрезвычайным препятствием к практическому осуществлению экономически выгодной газовой турбины являются высокие температуры, с которыми газы должны работать в турбине: для получения достаточно высокого коэффициента полезного действия приходится прибегать или к специальным материалам, или применять особые средства для понижения этой температуры (что обыкновенно понижает и коэффициент полезного действия турбины).

Из попыток осуществления турбины внутреннего сгорания до последнего времени заслуживала серьезного внимания только турбина Гольцварта, так как более ранние конструкции исполненных турбин Караводина и Арманго остановились на первых ступенях опытов и не получили дальнейшего развития. Из них турбина Караводина имела мощность, равную только 2 л. с., а турбина Арманго, хотя и была большей мощности (83 эфф. л. с.), но работала с коэффициентом полезного действия, равным только 3% (по другим сведениям до 9%).

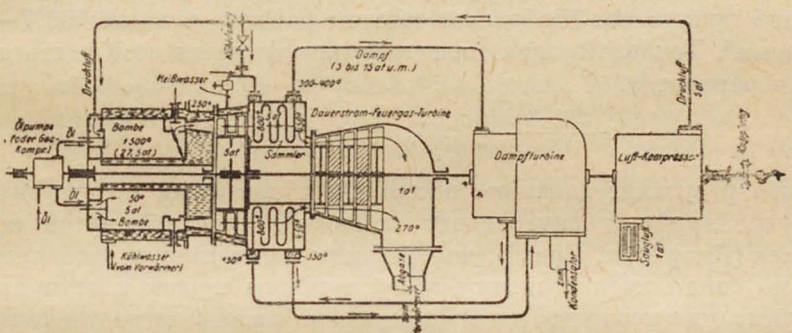
Работы Гольцварта начались с 1908 г., причем он избрал тип турбины, работающей отдельными взрывами, без предварительного сжатия. В опытной турбине 1910 г. было введено небольшое предварительное сжатие (0,5 атм), причем давление взрыва дошло до 9 ата. К 1914 г. заводом Тиссен в Мюльгейме была построена новая опытная турбина Гольцварта, результаты опытов с которой (задержанные войной) опубликованы были в 1920 г. В этой турбине первоначальное сжатие было повышено до 2—3,3 ата, вследствие чего и давление взрыва повысилось до 12—14 ата. Кроме того введены были другие конструктивные усовершенствования. Результаты испытаний этой турбины были более удовлетворительны, чем предыдущей, но все же полный экономический коэффициент полезного действия этой турбины (т. е. отношение термического эквивалента одной л. с. ч. к расходу в калориях на 1 л. с. ч.) не превосходил 13%, т. е. не доходил даже до величины, получаемой у хороших паровых машин (по более поздним сведениям коэффициент этот доходил до 18%).

В послевоенных опытах с турбиной Гольцварта большое участие принимает Шюле, посвятивший разбору вопроса о газовой турбине большую главу в 4-м и 5 изданиях своей «Технической термодинамики» (1923 и 1931 г.). Опыты с турбиной Гольцварта продолжались и далее с затратой больших денежных средств, но технические трудности построения удовлетворительно работающей газовой турбины не были преодолены, и в заключение опыты эти были приостановлены (но в другом виде были возобновлены на заводе Броун-Бовери).

В 1930 г. Шюле выступил с новым предложением соединенной газовой и паровой турбин. [1]

Предложение это уясняется из следующей схемы (фиг. 220), приуроченной к конкретным данным.

Согласно этой схемы воздух засасывается воздушным компрессором из атмосферы и сжимается до 5 ата. Этот воздух направляется в камеру сгорания, куда поступает также сжатый до того же давления отдельным компрессором горючий газ (или поданное насосом жидкое топливо). При зарядке воздух или смесь газа с воздухом принимает более высокую температуру, т. е. примерно равную 50°. Взрыв производится электрической искрой, температура возрастает (при составе горючей смеси с теплотворной способностью в 450 кал/м³) до 1650°, при отсутствии теплообмена с водой, охлаждающей камеру взрывания, и до меньшей температуры — в предположении отдачи тепла; при этих же предположениях о теп-



Фиг. 220

лообмене давление после взрыва повышается до 30—22 ата (смотря по количеству отнятого тепла). С этим давлением и температурой газы поступают на ступень высокого давления газовой турбины, представляющую собой колесо Кэртиса с двумя ступенями скорости. Расширение происходит в этом колесе от давления взрыва до 5 ата, причем температура понижается. Скорость истекающего газа получается, при разных предположениях расчета, порядка 1280—1038 м/сек., т. е. немногим выше, чем в колесах Кэртиса, применяемых в паровых турбинах.

Выпускная камера из колеса Кэртиса представляет собой сборник для газа, в котором происходит охлаждение газа до температуры в 450°; это охлаждение производится водяным паром, проходящим через змеевики, поставленные в сборной камере.

Полученный газ, с давлением в 5 ата и температурой в 450°, работает в части низкого давления газовой турбины. Водяной же пар, полученный первоначально в счет охлаждения газов, выходящих из газовой турбины, а затем — воспринимающий теплоту в камере сгорания и в сборнике после

[1] W. Schüle. Technische Thermodynamik, 5-е изд., т. 1, ч. 2, § 64.

колеса Кэртиса газовой турбины, идет в обыкновенную паровую турбину, в которой работает при 15 ата начального давления в температуре в 300°.

По расчетам Шюле, приуроченным к рассматриваемому примеру, получаются такие количества использованного тепла:

Газовая турбина:

Колесо Кэртиса (часть высокого давления) . .	45,5 кал/м³
Часть низкого давления	70,5 »
Паровая турбина	74,7 »
Всего . . .	190,7 кал/м³

Отсюда надо отнять работу сжатия воздуха компрессором (при работе на жидком топливе), которая получается для изотермического сжатия равной 41,8 кал/м³. Если принять полный изотермический коэффициент полезного действия компрессора равным 63%, то получается работа, необходимая для сжатия воздуха, равная 66,4 кал/м³. Таким образом, в турбине получается свободный остаток работы, равный 190,7—66,4 в 124,3 кал/м³. Тепловой экономический коэффициент всей установки получается равным

$$\frac{124{,}3}{450} = 0{,}277, \text{ т. е. около } 28\%$$

Таков результат довольно осторожных новейших подсчетов Шюле.

Другие турбины внутреннего сгорания, предлагавшиеся в новейшее время (Штаубера, Бреда), не получили, повидимому, особенного развития, но самая идея создания такой турбины продолжает привлекать к себе внимание исследователей (как можно видеть из настоящего краткого обзора).

В отчете о докладе проф. Церковитца [1] приводится мысль его о газовой турбине, работающей со сгоранием при постоянном давлении (т. е. по циклу Дизеля). Для такой турбины он считает совершенно необходимым соединение с паровой турбиной. Повидимому, это соединение явится неизбежной принадлежностью газовых турбин ближайшего времени.

Научно-исследовательская работа в области паровых турбин

Развитие турбостроения в новейшее время потребовало углубленного исследования как многих термодинамических вопросов, так и вопросов прочности в паровых турбинах.

Для проведения термодинамических расчетов в паровых турбинах необходимо было прежде всего изучение свойств пара высокого давления и перегрева. Работы, посвященные этому вопросу, чрезвычайно многочисленны. [2] Они повели к выработке «стандартных» международных таб-

[1] Zerkowitz в статье «Neue Ergebnisse der wärmetechnischen Forschung.», Z. d. VDI, № 37, 1932.

[2] Литература по вопросам исследования водяного пара до 1931 г. приведена в книге А. А. Радциг «Формулы, таблицы и диаграммы для водяного пара», 3-е изд., 1931. Новейшие работы характеризованы в статье Костровой «О новых таблицах констант водяного пара», Изв. Теплотехн. инст., № 7 (85), 1933.

лиц свойств водяного пара, от которых в новых таблицах (Каллендара, Мольс, Кноблауха) допущены только очень небольшие отклонения, но работа по уточнению формул и таблиц продолжается и дальше. Обширные исследования произведены по вопросу о движении пара в направляющих аппаратах и в рабочих колесах паровых турбин. Исследования эти далеко нельзя считать законченными. [1]

Основной термодинамический расчет паровых турбин продолжает интенсивно разрабатываться. Можно упомянуть здесь о работе Форнера и др. [2] Еще более трудным является вопрос о работе турбины при условиях, отличных от нормальных. Работы Ренфорда, посвященные этому вопросу, [3] являются только первым шагом в исследовании этого вопроса.

Также важен вопрос о работе турбин с отбором пара, которым занимались некоторые советские исследователи. [4]

Из трудов по регуляторам и регулированию паровых турбин необходимо отметить работы проф. П. Н. Вознесенского и И. И. Кириллова. [5]

Широкое развитие турбостроения потребовало, наряду с решением ряда термодинамических вопросов, также глубокого изучения сил, действующих в отдельных частях турбин и выработки методов расчета этих частей. При решении этих вопросов потребовалось применение весьма совершенных методов новейшей математики: интегрирование дифференциальных уравнений помощью рядов и других методов приближенного интегрирования, применение специальных функций (Бесселя в новейшее время, Лежандра и гипергеометрического ряда) и т. п. Заслуга постановки, а частью и решения многих из этих вопросов, принадлежит Стодола, знаменитая книга которого является неисчерпаемым источником для нахождения положений, необходимых для постановки многих задач, касающихся прочности турбинных частей. Многие из этих вопросов исследованы германскими, английскими и советскими учеными (С. П. Тимошенко, Г. С. Жирицкий, М. И. Яновский). Многие вопросы до сих пор не решены с надлежащей точностью и нуждаются в дальнейших исследованиях (сюда относится, например, вопрос о прочности турбинных диафрагм, до сих пор нерешенный вполне точно теоретически).

---

[1] Faltin. Erforschung der Dampfturbinenschaufeln. Die Wärme, № 30—32, 1933.

[2] См. Форнер. Термодинамический расчет паровой турбины, Энергоиздат, 1933.

[3] Renfordt. Arch. f. Wärmewirtsch., 1928., стр. 389. Die Wärme, стр. 828, 1930.

[4] Якуб. Теплосиловые установки, Энергоиздат, 1933. «Типизация паровых турбин», ч. 2, Энергоиздат, 1933. М. Якуб. Паровые турбины. Стандарты, 1935.

[5] Проф. И. Н. Вознесенский. К вопросу о выборе схемы регулирования теплофикационных турбин, «За советское энергооборудование», к XVII Съезду ВКП(б), Энергоиздат, 1934. И. И. Кириллов и С. А. Кангор. Влияние паровых объемов на регулирование колеса специальных турбин. «За советское энергооборудование», 1934.

В дальнейшем необходимо, конечно, продолжение теоретических исследований, а также получение чисто опытного материала, необходимого для практического решения многих задач. Особенное место среди этих задач занимает вопрос о колебаниях в частях турбин; до недавнего времени занимались только колебаниями изгиба турбинных валов, а в настоящее время приходится исследовать и вращательные колебания валов и колебания дисков, лопаток и фундаментов, так как опыт показал, что продолжительное влияние таких колебаний в движущихся частях турбины может вызвать утомление металла и разрушение этих частей.

Что же касается колебаний изгиба турбинных валов, то в настоящее время валы строятся преимущественно жесткие, с сравнительно небольшим превышением числа оборотов над критическим (процентов на 15).

Устранение опасности от колебаний изгиба требует, главным образом, хорошего выбалансирования ротора, на что обращается большое внимание.

Крутильные колебания валов имеют для турбин меньшее значение сравнительно с колебаниями изгиба, так как электрические генераторы, чаще всего соединенные с валами паровых турбин, редко имеют переменное магнитное поле. Но в случаях соединения с гребными валами судов и при турбинах, соединяемых с механическими передачами, внешние силы могут иметь периодический характер и вызвать опасные явления колебаний и резонанса. Поэтому в этих случаях необходимо делать расчеты и на крутильные колебания.

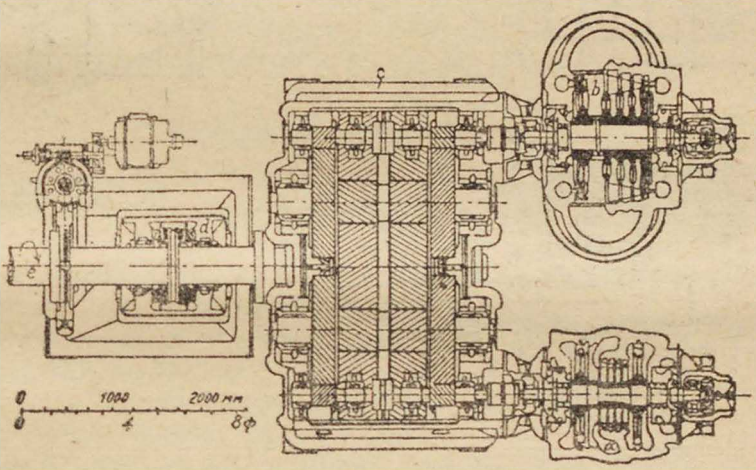
Колебания лопаток часто приводят к усталости в них металла и к разрушению их, которое может сопровождаться крупными повреждениями всей турбины. Поэтому в новейшее время проверка лопаток на колебания является обязательным моментом расчета турбины. Расчеты эти усложняются недостаточной надежностью предположений о закреплении лопаток у основания и обода и у связывающей их проволоки. Поэтому многие частности расчетов требуют еще экспериментальной проверки. Но и приближенные решения, даваемые в настоящее время, чрезвычайно важны.

Еще большей сложностью отличается исследование колебаний дисков, так как в них колебания происходят в двух измерениях и приходится исследовать узловые линии. Здесь тоже приходится вырабатывать приближенные методы, которые облегчаются довольно однообразным характером сечения дисков.

Из других элементов турбин, в расчете которых сделаны большие успехи в новейшее время, нужно указать на подшипники, как упорные (конструкция Мичелля и Кингсбюри), так и опорные. Конструкция Мичелля произвела большой переворот в типе самих подшипников, а также сделала возможным отказ от разгрузочных поршней в реактивных турбинах, что укорачивает и упрощает всю турбину. Конструкция Мичелля является результатом применения гидродинамической теории трения и является новым свидетельством важности глубоких теоретических исследований.

Судовые турбины

Мы говорили уже, что для послевоенных судовых паровых турбин характерным является применение зубчатой передачи. Почти все современные судовые турбины строятся с зубчатой передачей, что освобождает их от зависимости в выборе числа оборотов от свойств гребного винта. Применение зубчатой передачи приблизило конструкцию судовых паровых турбин к конструкции стационарных паровых турбин и позволило повысить коэффициент полезного действия судовых паровых турбин и уменьшить огромные их размеры и вес, о которых мы говорили. Комбинации цилиндров высокого и низкого давления с зубчатыми колесами и гребными валами могут быть очень разнообразны. Для обратного хода ставятся специальные турбины обратного хода меньшей мощности и более простой конструкции. В случае необходимости особенно



Фиг. 221

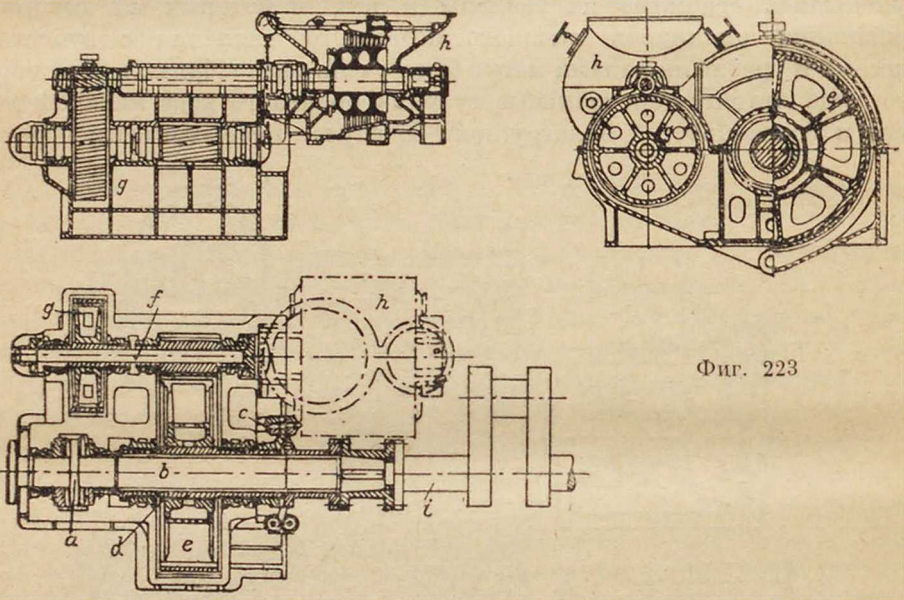
сильно уменьшить число оборотов паровой турбины применяют двойную зубчатую передачу. Мы ограничимся приведением только одного примера судовой турбины «Всеобщей компании электричества» мощностью в 5400 л. с. (на гребном валу) с двойной зубчатой передачей (фиг. 221).

Число оборотов главной турбины — 3600, первого вала — 650, второго — 34.

a — главная турбина высокого давления
b — » » низкого »
c — зубчатая передача
d — упорный подшипник гребного вала
e — гребной вал

Новые применения зубчатой передачи к паровым турбинам (в которых можно видеть возвращение к идее Лаваля) сделали также возможной постановку вопроса о применении паровой турбины к аэроплану.

Соображения о возможности такого применения и даже отрывочные сведения о попытках такого применения иногда проскальзывают в технической литературе.[1] Говоря о судовых турбинах, нужно упомянуть еще о том, что в новейшее время вновь возбуждается вопрос о применении в судовых установках электрической передачи от паровых турбин к гребному валу. [2] Особенно замечательна новейшая установка с электрической передачей на громадном французском пароходе «Normandie» с водоизмещением в 75 000 т. [3] Мы говорили уже о соединении в судовых установках паровых турбин с паровой машиной по системе Бауэр-Вах.



Фиг. 223

Фиг. 222

a — главный упорный подшипник, *b* — насквозь проходящий гребной вал, *c* — соединительная муфта, *d* — пустотелый вал, *e* — зубчатое колесо второй ступени, *f* — вал первой ступени, *g* — зубчатое колесо первой ступени, *h* — турбина для отходящего пара, *i* — коленчатый вал паровой машины

Кроме системы Бауэр-Ваха в новейшее время предлагается ряд других способов соединения судовых машин с паровыми турбинами. Один из них — система Броун-Бовери, изображена на фиг. 222 и 223.

Турбина имеет лопатки для прямого и обратного хода; она работает при 3 400 оборотах в минуту с двойной зубчатой передачей к греб-

[1] См., например, статью M. Rabinowitch «De l'utilisation des turbines à vapeur dans l'aéronautique», Chaleur et Industrie, 1934.

[2] См. литературу у Flügel, Dampf-und Gasturbinen, стр. 29—30 и статью The electric propulsion of Ships, Engineering, 2 сентября 1932.

[3] Génie Civil, 1-е полугодие 1935 г. № 21. Следует отметить, что английский пароход «Queen Mary», таких же гигантских размеров как «Normandie», строится с зубчатой передачей. Z. d. VDI, № 21, 1935.

ному валу, делающему 76 оборотов в минуту. Главное зубчатое колесо сидит на пустотелом валу, соединяемом с главным валом посредством разъемной муфты.

В других системах комбинация работы паровой машины и паровой турбины делается совершенно другим методом. Так, в системе Иогансена (Iohanssen),[1] паровая турбина, работающая отходящим паром из паровой машины, действует на турбокомпрессор, сжимающий пар во время его прохода между цилиндром высокого и цилиндром низкого давления и повышая теплосодержание этого пара, увеличивает работу цилиндра низкого давления.

В системе Линдгольмена (Lindholmen) турбина для отходящего пара приводит в действие динамомашину, ток от которой частью используется во вспомогательных механизмах корабля, частью употребляется непосредственно для нагревания пара в промежутке между средним и низким цилиндрами паровой машины.[2]

Обстоятельный обзор и характеристика комбинированных систем даны в статье инженера Касавина «Одновальные комбинированные установки с зубчатой передачей и конструкция их гибких муфт».[3]

Паротурбостроение в СССР

Как мы говорили в главе IV (3-го периода), паротурбостроение в области стационарных турбин почти не существовало в дореволюционной России. В последние годы империалистической войны и во время гражданской войны даже и это производство умерло. Возрождение паротурбостроения на Металлическом заводе имени Сталина началось в 1923 г.,[4] когда была построена турбина в 2000 квт; в 1924 г. была выпущена турбина в 3000 квт, в 1925 г. — турбина в 10 000 квт, а затем завод приступил к проектированию турбин на повышенное давление в 25—35 ата, при температуре в 375—425°.

Договор о технической помощи, заключенный в 1927 г., позволил заняться производством еще более крупных турбин, и в 1930 г. была выпущена первая турбина в 24 000 квт при 3000 оборотах, а в 1931 г. завод начинает строить турбины в 50 000 квт и 1 500 оборотов. В настоящее время Металлический завод занят, главным образом, производством этих крупных турбин.

Он изготовляет также теплофикационные турбины в 25 000 квт и подготовляет проекты конденсационных турбин в 50 000 квт на давление в 55 ата при 3000 оборотах.

Конденсационная турбина Ленинградского металлического завода в 50 000 квт при 1 500 оборотах изображена на фиг. 224.

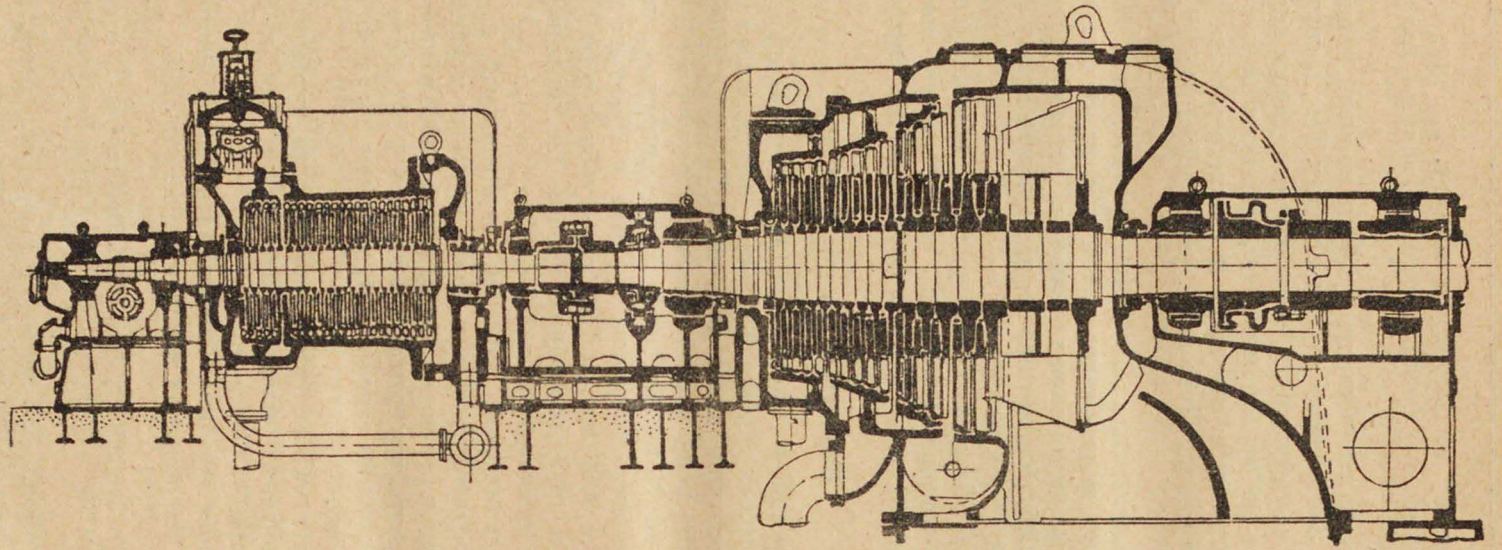
---

[1] Z. d. VDI, 1933. Shipbuilder, Juli, 1932., Engineering, 13 октября 1933.

[2] The Lindholmen Regenerative Systeme for Marine Reciprocating Engine, Shipbuilder, 1932.

[3] Труды Ленинградск. инст. инженеров водного транспорта, вып. 4, 1934.

[4] Энергооборудование СССР, вып. 1, Энергоиздат, 1934.



Фиг. 224

Производство турбин до 12 000 квт организовано на Кировском заводе (быв. Кр. Путиловец). Там изготовляют такие типы турбин:

Таблица 12

Название и тип турбины	Мощность квт	Число оборотов	Начальн. давление ата	Начальн. темпер. °С	Примечание
ОК 30 конденсационная .	3 000	3 000	16	350	—
СН 26 конденсац. бесподвального типа	4 000	5 000 / 1 000	26	375	—
СК теплофикационная бесподвального типа . .	4 000	5 000 / 1 000	29	400	Отбор 17/ч. при 5 ата
С 46 теплофикационная бесподвального типа . . .	6 000	3 000	29	400	Отбор 25/ч. при 6 ата
65 конденсационная . . .	12 000	3 000	29	400	

Изготовляются также и некоторые другие типы турбин (например, тип ТНВ 65 для привода воздуходувки с производительностью 3100 м³/мин.

Параметры и типы всех перечисленных турбин вполне современные.

Общая мощность турбин, выполненных за первое пятилетие в СССР, равна 1 177 200 квт.

Кроме ленинградских заводов, крупное турбостроение начато на Харьковском турбостроительном заводе, на котором в настоящее время изготовлена турбина в 50 000 квт самостоятельно разработанной конструкции. В настоящее время этими же заводами разработаны проекты турбин в 100 000 квт и в ближайшем времени приступлено будет к их изготовлению.

Из этого краткого обзора видно, что паротурбостроение в СССР поставлено за истекшие годы на совершенно прочные и современные основания.

Особенно благоприятные условия для развития имеют в СССР теплофикационные турбины, так как крупные станции с соединенным использованием тепла и электрической энергии несравненно легче могут быть осуществлены в условиях социалистического планомерного хозяйства, чем в условиях частного капиталистического хозяйства.

Глава IV

ПОСЛЕВОЕННОЕ ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЕ

Бескомпрессорные и крупные дизельмоторы

Из двигателей внутреннего сгорания мы остановимся почти исключительно на дизельмоторах, как на двигателях, имеющих наиболее важное значение в теплотехнике, тем более, что в области двигателей, работающих на легком топливе, замечается в последние годы стремление к переходу на работу по принципу Дизеля, с применением тяжелого топлива. В новейшее время большое значение в качестве транспортных двигателей приобретают еще газогенераторные двигатели. В этой области большие успехи достигнуты нашими исследователями в СССР (В. С. Наумов, В. Ю. Гиттис, В. А. Карпов и др.). За недостатком места мы не можем останавливаться на этом вопросе.

В области дизелестроения в последние годы достигнуты тоже большие успехи, но развитие дизельмоторов все же не носит такого бурного характера, как развитие паровых турбин и паровых котлов.

Самым крупным достижением в послевоенном дизелестроении является введение бескомпрессорного распыливания нефти. Мы видели уже, что попытки устройства двигателей, работающих по циклу Дизеля, но не применяющих компрессора делались еще до войны (двигатели Тринклера, Бронса), но это были в общем несовершенные конструкции, не получившие особенного развития.

Виккерс ввел первый (во время войны) впрыскивание посредством насоса, подающего нефть в особый цилиндр, расположенный рядом с цилиндрами двигателя и сжимающий там сильную пружину. Эта пружина и доставляет давление, необходимое для распыливания топлива, но для надлежащего распыливания величина этого давления пружины должна быть чрезвычайно значительна: до 300 ата и выше. Несмотря на затруднительность осуществления таких давлений и поддержания при них плотности соединений, эта система получила распространение в Англии для крупных морских двигателей. [1]

---

[1] История введения бескомпрессорных дизелей в Англии во время войны изложена в статье А. А. Радцига «Вопросы дизелестроения в Западной Европе и Америке». Техн.-экон. вестн., № 1, 1932.

В дальнейшем бескомпрессорное распыление стало распространяться прежде всего в мелких и средних дизельмоторах. Эта область в настоящее время всецело обслуживается бескомпрессорными конструкциями. Для этих двигателей компрессор являлся особенно неудобным, так как сильно удорожал эти установки и требовал внимательного ухода. Но затем мощность бескомпрессорных дизельмоторов стала сильно возрастать и в настоящее время имеются примеры бескомпрессорных дизельмоторов самых крупных мощностей.

Так, например, бескомпрессорное распыливание принято в больших двигателях по 12 000 л. с., построенных заводом МАН для станции Геннингсдорф в Германии. Также в виде бескомпрессорного построен самый большой из существующих дизельмоторов — дизельмотор для станции в Копенгагене мощностью в 22 500 л. с., исполненный на заводе Бурместер и Вайн.

В бескомпрессорных дизельмоторах расход нефти быстро сравнялся с расходом двигателей с воздушным распыливанием и в настоящее время испытание бескомпрессорных двигателей дает ряд «рекордных» цифр малого потребления нефти. Так, например, в бескомпрессорных двигателях Юнкерса, получался расход в 165—170 г на эффективную лошадиную силу, что представляет некоторое улучшение по сравнению с наименьшим расходом, принимавшимся для дизельмоторов с воздушным распыливанием — порядка 180 г на эффективную лошадиную силу. В соответствии с этим и наибольший экономический коэффициент полезного действия повысился с 35% до 38% ($\frac{632,3}{0,165 \cdot 10000} = 0,383$).

В двигателях завода МАН по 12 000 л. с., о которых мы говорили выше, расход нефти оказался 164 кг/эфф. л. с. с коэффициентом до 0,363.

Бескомпрессорное распыливание достигается двумя различными приемами: просто механической подачей нефти насосом при очень высоких давлениях (200—300 ата и выше) — механическое распыливание и путем воспламенения части нефти в камере, связанной с форсункой и цилиндром двигателя (камерное распыливание), причем главная масса нефти выбрасывается полученными газообразными продуктами сгорания в цилиндр двигателя в сильно измельченном виде. Обе эти системы имеют своих сторонников и ни одна из них не получила решительного преобладания.

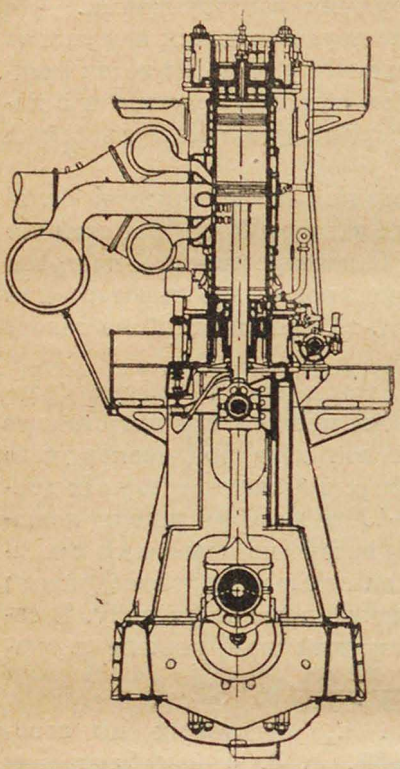
Примеры бескомпрессорных дизелей приведены дальше на фиг. 225 и 226.

Вторым существенным достижением послевоенного дизелестроения является крайне увеличенная мощность наиболее крупных единиц.

Перед войной мощность стационарных дизельмоторов доходила, самое большое, до 2000—2400 л. с., [1] на этом приблизительно уровне держались дизельмоторы и первое время после войны. Но в последние годы

[1] Если не считать знаменитого 12 000-сильного двигателя судового типа, построенного заводом Аугсбург-Нюрнберг и разрушенного по Версальскому договору.

появился ряд крупных дизельмоторов, вполне доказавших жизнеспособность таких больших мощностей. Первым из них является дизельмотор в 15 000 эффективных л. с., построенный в 1926 г. заводом Блом и Фосс (по системе завода Аугсбург—Нюрнберг).



Фиг. 225

Двигатель этот 2-тактный, двойного действия, 9 цилиндровый с числом оборотов, равным 94 в минуту, с компрессорным распыливанием. Результаты испытаний были вполне благоприятны: при полной нагрузке получился расход в 168—169 г на эффективную л. с. ч. (при нагрузке, равной приблизительно $^2/_3$ нормальной, этот расход был еще ниже, именно, получился около 165 г). В отношении регулирования двигатель этот тоже оказался весьма совершенным; при сбрасывании полной нормальной нагрузки число оборотов первоначально повысилось на 14,5%, но затем уже через 32 сек. достигло нормального уровня. Перегрузка 10% тоже достигалась без каких-либо неудобств и вообще во все время продолжительных приемных испытаний не обнаружено каких-либо неисправностей в работе. Двигатель этот предназначен для снятия пиков на Гамбургской электрической станции, его разрез представлен на фиг. 225.

Другим примером крупных дизельмоторов являются дизеля завода МАН мощностью в 12 000 л. с. для станции Геннингсдорф, о которых мы

Таблица 13

Показатели	Дизель 12 000 л. с.	Дизель 15 000 л. с.
Мощность на валу (эффективн.) л. с.	11 700	15 000
Электрическая мощность . . . . квт	7 500	10 000
Число цилиндров	10	9
Диаметр цилиндров . . . . . мм	600	860
Ход поршня . . . . . мм	900	1 500
Число оборотов	215	94
Наибольшая длина до соединит. муфты . . . . . м	13,85	23,4
Высота над осью вала, включая верхние клапаны . . . . . м	5,75	10
Вес . . . . . тонны	242	1 150

говорили выше. [1] В этих двигателях внесены большие улучшения по сравнению с двигателями в 15 000 л. с.: уменьшен вес и размеры и введено бескомпрессорное распыливание. Соотношение между размерами видно из приведенной таблицы.

Следует указать еще на двигатель Зульцера в 13 700 л. с. (2-тактный компрессорный) [2] и двигатель в 22 500 л. с. завода Бурместер и Вайн в Копенгагене для электрической станции этого города, а также на двигатели мощностью по 22 500 л. с., строящиеся для станции Сент Галлен (в Швейцарии). [3]

Двигатель Бурместера Вайн является крупнейшим из вообще построенных дизелей. Он бескомпрессорный, 2-тактный, двойного действия. Число цилиндров —8, диаметр —840 мм, ход поршня —1500 мм, число оборотов—115. [4]

На ряду с крупными стационарными дизельмоторами после войны получила чрезвычайное развитие постройка дизелей для судов.[5]

Фирмы, строившие дизельмоторные суда до войны, продолжают эту постройку и к ним прибавились еще Швеция (завод Нобеля в Стокгольме) и Норвегия. Число германских фирм, строящих судовые дизельмоторы тоже увеличилось: к прежним фирмам прибавились еще Блом и Фосс в Гамбурге, Немецкая верфь в Киле и др. По данным журнала «Engineer» уже в 1921 г. крупных моторных судов было построено 330 000 т, а в 1922 г. на 100 000 более, несмотря на тяжелое положение судостроения вообще в этом году.

Общий тоннаж моторных судов составлял уже тогда 6—7% всего мирового тоннажа исполняемых судов.

С тех пор развитие постройки моторных судов для торгового флота продолжается далее и эти суда сильно вытесняют суда с паровыми машинами и даже с паровыми турбинами. Даже и в области военного судостроения применение дизельмоторов распространяется уже не только на подводные лодки (до самых больших размеров), что было уже сделано до войны и во время нее, но даже на суда больших размеров.

Так, Лаудан приводит такие данные относительно немецких военных судов [6] (см. табл. на стр. 408).

Есть сведения о проектах французских военных судов с дизельной установкой в 100 000 л. с.

Общее количество моторных судов водоизмещением выше 1000 т, выпущенных с 1924 г. по 1930 г. включительно, составляет по всем странам

---

[1] Эта установка и самые дизеля описаны в статьях L a u d a h n «Dieselmotoren V, Berlin, 1932.

[2] Статья C. Z ü b l i n, Die Wärme, № 29, 1934.

[3] Z ü b l i n. Die Wärme, № 1, 1935.

[4] См. статью «Крупнейший стационарный дизель в 21 000 л. с. и датское теплоходостроение», Дизелестроение, № 1, 1932.

[5] А. А. Р а д ц и г. Вопросы дизелестроения в Западной Европе и Америке Технико-эконом. вестн., № 1, 1922.

[6] L a u d a h n. Dieselmaschinen V, стр. 134.

1 091 с общим тоннажем в 6 094 855 т. Мощность установленных на этих судах двигателей составляет 4 818 330 индик. л. с. [1]

Таблица 14

Показатели	Лейпциг	Бремен	Дейчланд
Общая мощность на валу л. с.	12 000	26 000	50 000
Число главных двигателей	4	6	8
Мощность одного двигателя	3 100	3 550	7 100
Способ работы	Двухтактный двойного действия бескомпрессорный		
Число рабочих цилиндров	7	8	9
Диаметр мм	300	300	420
Ход поршня мм	400	400	580
Число оборотов в мин.	600	600	450
Средняя скорость поршня м/сек.	8,8	8,8	8,7

В области дизелестроения в СССР можно отметить стандартизацию типов, [2] переход к бескомпрессорным дизелям, повышение мощности отдельных единиц и общее увеличение количества производимых двигателей. Мощность, развиваемая в одном цилиндре, повышена в некоторых конструкциях до 500 л. с., что при 6 цилиндрах дает 3000 л. с., вопрос о дальнейшем значительном увеличении мощности двигателей тоже поставлен. Двигатель в 2 500 л. с. завода «Русский Дизель» показан на фиг. 226.

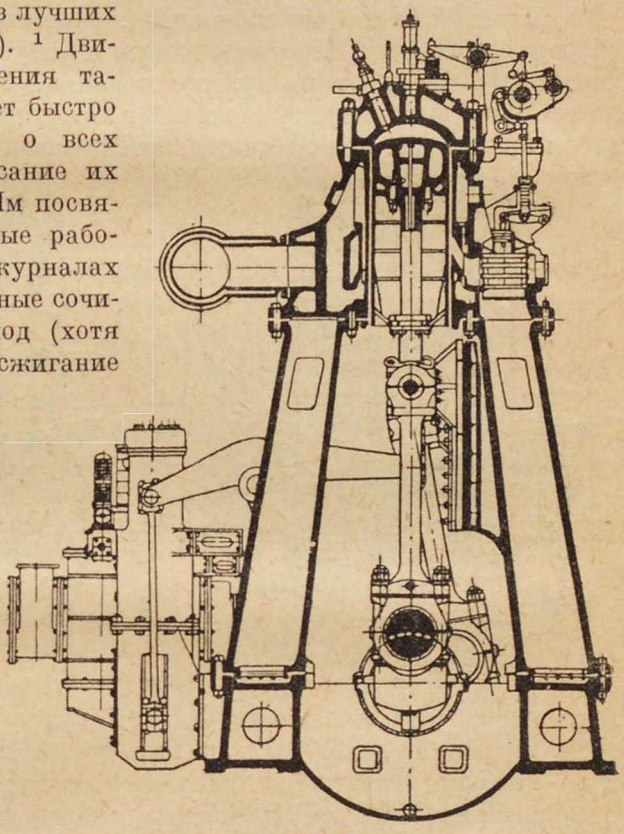
Легкие-быстроходные дизельмоторы

Увеличение числа оборотов в дизельмоторах первоначально вызвано стремлением применять их на подводных лодках. В этом отношении во время мировой войны достиг, как мы говорили, замечательных результатов завод МАН (Аугсбург — Нюрнберг), доведший число оборотов до 400—450 с мощностями в несколько сот л. с. и чрезвычайно облегчивший вес этих быстроходных двигателей; по этому же пути пошли и другие немецкие заводы (Даймлер, Кертинг, Герлитц, Крупп и др.) В первое время после войны потребность в быстроходных двигателях для подводных лодок в Германии исчезла, но эти двигатели стали применяться для других целей. С развитием бескомпрессорных дизелей естественной явилась идея соединить бескомпрессорную конструкцию с быстроходным двигателем, увеличив еще более его число оборотов. Таким образом, возник уже в 1925 г. автомобильный двигатель завода МАН (4 цилиндра, 45 л. с.,

[1] Дизелестроение, № 2—3, 1932, стр. 35. Там же помещены данные относительно систем судовых двигателей разных заводов.

[2] Стандарт для дизельмоторов — ОСТ 7106. Стандарт этот приведен в книге инж. техн. Н. П. Макаревича «Установки двигателей внутреннего сгорания». Ленинград, 1935 г. В этой же книге собрано также большое количество Всесоюзных стандартов деталей дизельмоторов. В ней тоже приведена полная таблица производства дизельмоторов на заводах СССР с 1899 по 1932 г.

1000 оборотов в минуту); затем постройка этих двигателей стала быстро развиваться как в Германии, так и в других странах. Они нашли применение во всех тех областях, где применяются легкие быстроходные двигатели, т. е. в автомобилях (грузовых и легковых), тракторах, аэропланах. Число оборотов некоторых из этих двигателей доходит в настоящее время до 2 500, вес на силу 4—4,5 кг, расход нефти до 180—170 г (т. е. до того же размера, что и в лучших стационарных двигателях). [1] Движение в сторону применения таких двигателей продолжает быстро развиваться и в отчетах о всех новейших выставках описание их занимает видное место. Им посвящены также многочисленные работы во всех технических журналах за последние годы и отдельные сочинения. [2] Для СССР переход (хотя бы даже частичный) на сжигание тяжелого топлива вместо бензина в легких двигателях представляет крупнейшее экономическое значение и потому следует признать вполне правильным мнение проф. В. Ю. Гиттиса, В. В. Синеуцкого и других специалистов по двигателям внутреннего сгорания [3] о необходимости быстро и в самом широком размере наладить исследовательскую работу, необходимую для выработки типа легких дизельмоторов и условий рациональной их эксплоатации на тяжелом жидком топливе. Надо заметить, что типы этих двигателей, изготовляемых иностранными заводами, чрезвычайно разнообразны и потому выбор рационального типа такого двигателя для советских условий



Фиг. 226

[1] См. подробную таблицу таких двигателей в книге проф. В. Гиттиса «Автомобили», Москва, 1931.

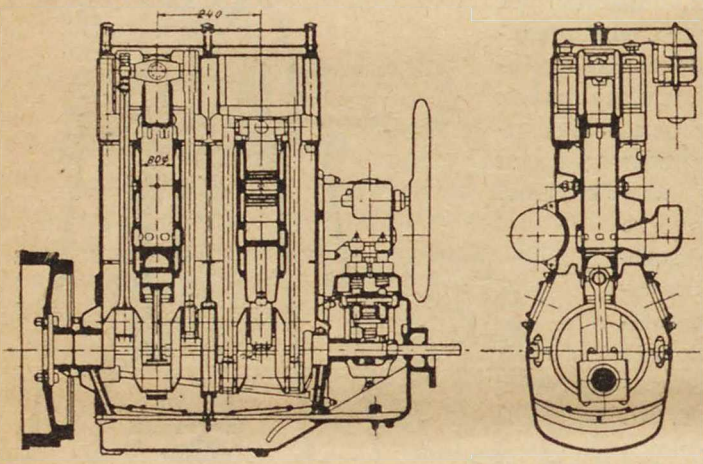
[2] Легкие дизельмоторы. Сборник статей под редакцией проф. В. В. Синеуцкого, Киев, 1931. Быстроходные дизеля. Сборник статей под редакцией Н. Горбунова, Энергоиздат, 1933.

[3] Г. Т. Калиш, В. А. Колосов, Н. М. Левин — Кофси. Быстроходные дизельмоторы автотракторного типа. Авиац. и автотракт., изд. 1933.

невозможен без предварительных исследований, о необходимости которых говорилось выше.

Легкие двигатели Дизеля строятся как с механическим, так и с камерным распыливанием. В качестве примера двигателя с механическим распыливанием приводим двигатель Юнкерса, в котором применены противоположно движущиеся поршни (фиг. 227).

Двигатель этот 2-цилиндровый, общей мощностью в 45 л. с. при 1000 оборотах в минуту. Противоположно движущиеся поршни дают очень хорошую очистку от продуктов сгорания. Двигатель этот отличается малым расходом горючего, около 180 г на эффективную силу в час. Подача нефти происходит под очень большим давлением — до 600 ата.



Фиг. 227

На фиг. 228 изображен двигатель Рикардо, развивающий в 4 цилиндрах 35 л. с., при 1 500 оборотах в минуту, с камерным распыливанием.

Летом 1934 г. в СССР был организован пробег автомобилей и испытание тракторов с дизельмоторами, в котором приняли участие несколько двигателей, изготовленных в СССР. По имеющимся сведениям результаты испытания оказались вполне удовлетворительными. В частности — высокое место среди двигателей заняли советские двигатели.

Испытание это дает несомненно большой толчек развитию постройки легких дизельмоторов в СССР.

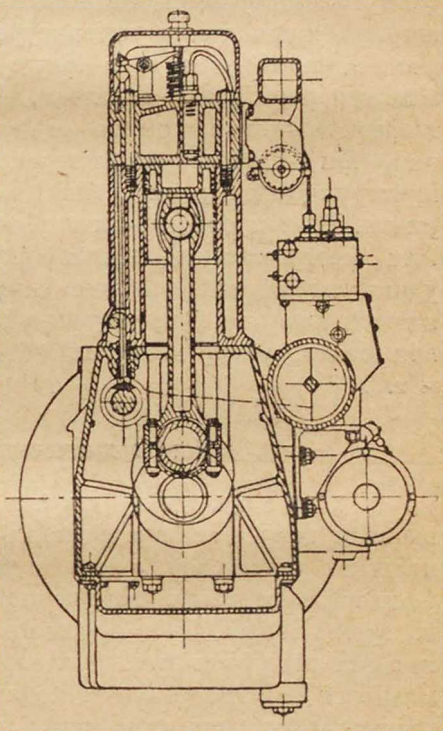
Научно-исследовательская работа в области двигателей внутреннего сгорания

Значительные успехи, достигнутые в области построения двигателей внутреннего сгорания вообще и дизелестроения в частности, тесно связаны с крупной исследовательской работой, производимой в этой области.

Так, прежде всего тщательно изучался вопрос о сжигании горючего как в двигателях с быстрым сгоранием, так и в двигателях Дизеля. Вопрос о быстром сгорании изучался как физиками и химиками, так и техниками. Такого рода опыты производились в Германии в Гос. физико-техническом институте (Гольборном, Шеелем и Генингом), в лаборатории Нернста (Пиром, Бьеррум, Волем), в Англии (Д. Клерком, Виллером),

в Америке (Ланмюиром), в СССР академиком Н. Н. Семеновым. Непосредственные опыты с сгоранием в двигателях с быстрым сгоранием производили Негель, Нейман и др. Сгорание в дизельмоторах было предметом многочисленных исследований, особенно в связи с переходом к бескомпрессорному распыливанию; можно указать на известные работы Вейсгара, Эйхельберга и особенно Неймана, работы которых продолжаются до новейшего времени, Э. Шмидта и др. Интересные общие соображения о роли физики в развитии двигателей внутреннего сгорания имеются у Хорльтона («Engineering», № 29, май 1931 г.).

В связи с вопросом о сгорании разбирался вопрос о карбюрации в двигателях, работающих на легком топливе и о распыливании в дизельмоторах. Вопрос о карбюрации имеет обширную литературу. [1] Исследование вопросов распыления в дизельмоторах произведено Эйхельбергом.



Фиг. 228

Вопросы сгорания в двигателях внутреннего сгорания тесно связаны также с вопросами теплопередачи. Эти вопросы связаны также с определением добавочных температурных напряжений. Поэтому вопросы теплопередачи в двигателях тоже вызывали к себе большое внимание исследователей. Ими занимались такие крупные исследователи как Нуссельт, Эйхельберг, Гребер, для дизельмоторов Рихтер, Герцфельд, Геркер для легких двигателей. Из новейших советских исследователей в этой области следует назвать инж. Агафонова.

В 2-тактных двигателях большую роль играют вопросы продувки, которым посвящен тоже целый ряд важных работ; более старые из них Креглевского, Гутмана и О. Фешпля, из более новых особенно важна работа Рингвальда.

Следует также указать на работы, посвященные тепловому расчету двигателей внутреннего сгорания. В этой области, на основе данной В. И. Гриневецким, возник целый ряд работ советских исследователей: по дизельмоторам работы Е. Мазинга, В. Синеуцкого, В. Карпова, по легким двигателям — Н. Р. Брилинга, С. И. Алексеева и В. А. Петрова.

Вопросы прочности в двигателях внутреннего сгорания были, как мы говорили, впервые широко затронуты Гюльднером в его известной книге,

[1] См. Л. В. Клименко. «Проектирование автомобильных двигателей», Ленинград, гл. X, 1930.

имевшей в свое время чрезвычайное влияние на рационализирование конструкции этих двигателей. С тех пор создалась обширная литература по расчету как тяжелых, так и легких двигателей. [1] Из вопросов прочности двигателя, особенно привлекающих к себе внимание исследователей в новейшее время, надо упомянуть о крутильных колебаниях вала, играющих большую роль при расчете быстроходных двигателей. [2] Из специальных сочинений, посвященных этому вопросу, особенной известностью пользуется книга Гольцера, этот вопрос излагается также подробно у Дуббеля и в вышеупомянутой книге Л. В. Клименко, где приведена также обширная журнальная литература по этому вопросу. Основные методы расчета приведены и в книге С. П. Тимошенко «Теория колебаний в инженерном деле», Госиздат, 1932 г. Наряду с исследованием вопросов теоретического характера относительно двигателей внутреннего сгорания, при их конструкции играют чрезвычайно важную роль (как и при конструкции паровых турбин) также вопросы надлежащего выбора материала. В этом отношении особенно крупные достижения имеются в легких быстроходных двигателях; для цилиндров применяется чугун, удовлетворяющий особенно высоким требованиям, для поршней применяются алюминиевые сплавы разного состава, для валов хромоникелевая сталь, распределительные органы — тоже из специальных сталей и т. д. [3]

Особые технические проблемы дизелестроения

Подзарядка двигателей. Введение воздуха под повышенным давлением предложено было, как мы говорили, Рато для аэропланных двигателей, с целью предупредить уменьшение их мощности на большой высоте при разреженной атмосфере. Это предложение, сделанное во время войны, было осуществлено при помощи газовых турбин, работающих отходящими газами аэропланных двигателей. В практике аэропланных двигателей оно находит теперь частое применение. В практике стационарных двигателей идея эта тоже не раз высказывалась. Так, например, в 2-тактных газовых двигателях, в которых применяется сжатый воздух для продувки и зарядки двигателя, делались предложения повысить давление продувочного воздуха (и подаваемого свежего газа) с целью повысить мощность и увеличить экономичность двигателя. В крупных 4-тактных газовых двигателях устройство с подзарядкой сжатым воздухом и газом предложено было заводом Эргардт и Земер, причем для сжатия воздуха применялся турбокомпрессор, приводимый в движение элек-

[1] Частью приведенная в книге Дуббеля «Двигатели внутреннего сгорания», Ленинград, 1928.

[2] По этому вопросу имеется ценная советская работа Н. М. Урванцева «Критическое число оборотов в дизельных установках», Гостехиздат, 1931.

[3] Материалы по дизелестроению в СССР и вообще по вопросам дизелестроения имеются в сборниках «Дизелестроение», издаваемых Научно-исследовательским институтом дизелестроения.

тромотором или паровой турбиной. Применение этого способа повышало коэффициент объемного полезного действия двигателя с 80 до 118% и увеличивало мощность двигателя на 48%.

Особенное значение вопрос о повышении мощности путем подзарядки приобрел для дизельмоторов, где он был в очень определенной форме поставлен Бюки (в 1927 г.). В своих опытах (1929 г.) Бюки доводил давление подаваемого воздуха от 1 ата (без наддувки) до 3 ата, причем получал чрезвычайное повышение давления конца сжатия от нормального (32 ата) до 94 ата; при этом среднее индикаторное давление повышалось с 5,7 почти до 15 кг/см^2. Расчеты, приводимые Бюки для разных комбинаций дизельмоторов и газовой турбины (служащей для подзарядки), приводят его к заключению о значительном повышении мощности дизельмотора, которое может быть достигнуто применением подзарядки. При этом повышается также коэффициент полезного действия двигателя.

Этот способ усовершенствования дизельмоторов начинает в настоящее время применяться как в стационарных, так и в судовых установках. [1] Вопрос о применении угольной пыли в двигателе внутреннего сгорания был, как известно, поставлен самим Дизелем, основной проект его «рационального теплового двигателя» предусматривал именно работу двигателя на угольном порошке. Но попытки Дизеля построить такой двигатель не увенчались успехом и он перешел к устройству двигателя, работающего на нефти (и на каменноугольной смоле). С тех пор идея устройства двигателя внутреннего сгорания, работающего на угольном порошке, привлекла к себе внимание многих изобретателей, но не повела еще к созданию двигателя вполне способного удовлетворять требованиям длительной и надежной эксплоатации. Однако, в новейшее время идея двигателя, работающего на твердом топливе, делает заметные успехи. В Германии много в этом направлении сделано инж. Павликовским; ему удалось построить двигатель в 80 л. с., работающий на угольном порошке и дающий расход в 2 050 кал./эфф. л. с. ч., что соответствует полному экономическому коэффициенту полезного действия, почти равному 31%, т. е. сравнительно немного отличающемуся от коэффициента полезного действия обыкновенного дизельмотора. Еще более благоприятные результаты получили в Америке (в институте Карнеги); там удалось построить двигатель, работающий на угольном порошке и расходующий только 1 945 кал/эфф. л. с. ч., что соответствует экономическому коэффициенту полезного действия, равному 0,325. Эти примеры показывают, что термодинамически вопрос о постройке экономично работающего двигателя, употребляющего угольный порошок, если не решен ими, то, во всяком случае, близок к разрешению. Дальнейшая судьба такого двигателя зависит от надлежащего конструктивного осуществления его, что вряд ли представляет неразрешимую задачу. Чисто экономически такой двигатель представил бы большие выгоды, так как стоимость одинакового числа

[1] См., например, отчет об опытах с дизельмотором, снабженным устройством Бюки, произведенных в 1930 г. (Engineering 28 февраля 1931 г., а также Génie Civil, № 7, 1-е полугодие 1931 г. и № 14, 2-е полугодие 1930 г.).

калорий гораздо меньше для угольного порошка, чем для тяжелого жидкого топлива. Так, для Германии (по немецким расчетам) стоимость 10 000 кал. в жидком топливе получается равной 12—14 пфеннингам, а тех же 10 000 кал. в угольном порошке (из бурого угля) 4—6 пфеннигам.

Для Советского Союза применение такого двигателя позволило бы применять в дизельмоторе более низкосортное топливо и освободило бы для других целей более ценную во всех отношениях нефть, что при всем богатстве СССР нефтью являлось бы желательным.

Таким образом, надо признать, что разработка вопроса о применении в дизельмоторах угольного порошка является желательной в СССР в ближайшее время. [1]

К специальным проблемам двигателей внутреннего сгорания вообще принадлежит вопрос об использовании в них отходящего тепла. В области двигателей внутреннего сгорания, как и в других областях теплотехники, эта утилизация получила в новейшее время большое распространение, причем получается полное использование тепла до 80—83%. [2]

---

[1] Новейшие сведения о двигателях, работающих на угольном порошке, имеются в статье Schütte. Arch. f. Wärmewirtsch., № 2, 1935.

[2] В. Ф. Прокофьев. Стационарные установки двигателей внутреннего сгорания. Энергоиздат, гл. VIII, 1933.

Глава V

НОВЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Бинарные циклы. Предложения Клода и Бушеро, Баржо и других

В своем изложении истории теплотехники мы разбирали главным образом осуществленные изобретения, получившие заметное техническое значение. Но нам приходилось касаться также таких предложений, которые до сих пор не нашли практического осуществления; примерами последних являются двигатель внутреннего сгорания, работающий на угольном порошке, газовая турбина. Имеется, конечно, целый ряд новых предложений, которые еще находятся в стадии опытов, о которых нельзя высказать категорического мнения и которые выходят за рамки настоящего сочинения. Число таких предложений очень велико и мы назовем только некоторые из них, которые обратили на себя внимание в последнее время.

Мы говорили в своем месте об идее Дю Трембле построения бинарной машины, у которой вода являлась бы рабочим телом в высшей ступени, а эфир в низшей ступени; мы упоминали также об идее Иоссе применять для низшей ступени сернистую кислоту и, наконец, привели новейшие сведения о ртутной турбине. Но вопрос о таких бинарных машинах ставится и в общем виде, причем можно не ограничиваться рассмотрением двойных циклов, но рассматривать тройные циклы с различными рабочими телами и т. д. В качестве рабочих тел предлагались такие тела, как моно-натро-бензол, анилин (негодные для этой цели по своей ядовитости). Горт (Hort) предлагал [1] для этих высших ступеней соляровое масло, в новейшее время для этой же цели предлагался дифенил, [2] бромистый алюминий, [3] но покамест без особенного успеха. Предложения этих разнообразных бинарных циклов не представляют ничего противоречащего термодинамическим выводам. Но можно сказать о них, как и многих других предложениях (о которых мы будем говорить дальше), что отсутствие противоречия с требованиями термодинамики и даже сравнительно благоприятные результаты подсчетов коэффициентов полезного действия

[1] Hort, Forschungsarbeiten, H. 116.

[2] Материалы по этому вопросу собраны в книге инж. Н. И. Дунаевского, о которой мы упоминали выше. Новейшие данные по бинарным циклам приведены в статье Gaffert. Trans. of Amer. Soc. Mech. Eng., № 8, 1934.

[3] Génie Civil, январь 1933 г.; предложение этого тела сделано Баржо (Barjot).

циклов с указанными телами являются условием необходимым, но далеко недостаточным для проведения их в жизнь: нужно не только исследование опытных установок, но прямые благоприятные указания промышленных установок.

Близкими к бинарным циклам являются циклы термохимические и цикл Кеннемана. [1] В этих циклах вместо конденсации применяется поглощение рабочего пара другим телом; выделяющаяся при этом теплота должна отводиться. При дальнейшем нагревании полученного тела вновь происходит его распад и выделение рабочего пара; этот процесс может неопределенно повторяться. Кеннеман предлагал цикл с парами аммиака, которые должны были поглощаться моноаммиачным хлористым цинком, превращающимся при этом в биаммиачный с выделением тепла. При нагревании последний вновь выделяет пары аммиака, которые могут работать в своей турбине. Высокие температуры, при которых протекает этот процесс, позволяет соединить его со второй ступенью — водяной, работающей на обыкновенную турбину. Сведений об осуществлении этого проекта для испытания его в крупных размерах нет, что объясняется неблагоприятными условиями для введения новых изобретений при обстоятельствах экономического кризиса.

Другой ряд новых предложений исходит из мысли об утилизации малых разностей температур. Эти предложения являются как бы развитием знаменитого утверждения С. Карно «повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы». [2] Из предложений этого рода особенной известностью пользуются предложения Клода и Бушеро (Claude et Boucherot) и Баржо (Barjot).

Предложение Клода и Бушеро состоит в идее утилизации разницы температур в нижних и верхних слоях тропических морей. В то время как температура на глубине 1000 м равна 4—5°, на поверхности тропических морей она достигает 25—30°. Таким образом имеется разность температур в 20—25°, которую можно использовать для получения энергии в паровой турбине низкого давления. Предложение Клода было доложено Парижской Академии наук в 1926 г. и с тех пор Клодом сделан целый ряд попыток осуществления своих идей; [3] последние сведения об этих работах являются благоприятными, [4] но вопрос этот подлежит дальнейшему выяснению. Другое предложение принадлежит Баржо. Он обратил внимание на разность температур между морской водой и окружающей средой в северных морях: в то время, как первая имеет температуру 2+ +3°, температура окружающего воздуха может опускаться в течение ряда месяцев до —30—40°. Для утилизации этой разности температур Баржо

[1] Изложение основ этих циклов имеется в той же книге Н. И. Дунаевского, там же приведена литература этого вопроса.

[2] Второе начало термодинамики, стр. 21.

[3] См., например, C l a u d e «Conférence sur l'utilisation de l'énergie des mers, Génie Civil, 1930 г., № 12, 2-е полугодие.

[4] См. Comptes rendus, 30 июля 1934 г. Заметка.

предлагает применять в качестве рабочего тела бутан, углеводород C_4H_{10}, который испаряется при —17° при атмосферном давлении [1] и не растворяется в воде. Бутан в жидком виде (охлажденный при низкой температуре) вводится в котел вместе с водой при 2—3°, причем он немедленно испаряется, вода же при этом замерзает и образовавшийся лед приходится удалять, что представляет собою операцию, которая окажется неудобной на практике. Пары бутана проводятся для работы через турбину и затем в конденсатор, в котором сгущаются при помощи замороженного соленого раствора, имеющего температуру —22°.

Схема Баржо — теоретически довольно проста. Она нуждается, конечно, в дальнейшей разработке и практическом испытании, но на нее следует обратить внимание, так как она может получить большое значение для северных местностей СССР.

Имеется еще ряд других предложений, о которых мы только упомянем в виду их неразработанности: предложение работать смесью паров воды и бензина (Mischdampfmotor), которое вызвало большую полемику в немецкой литературе; [2] предложение водородного двигателя «Эррен», по которому хотя и имеется описание, но без всяких технических деталей. [3]

Все предложения, кратко характеризованные в настоящей главе, очевидно, должны пройти период борьбы за оформление и внедрение в жизнь, которую проходили уже осуществленные изобретения, характеризованные в настоящей книге.

[1] Имеется 2 изомера бутана; в предложении Баржо дело идет об изобутане, представляющем собой жидкость, кипящую при —17°.

[2] Bosnjakowic, Berechnung einer Mischdampfkraftmaschine, Z. d. VDI, стр. 1197, 1931 г.

Demski, Mischdampfkrafterzeugung und der Widerspruch zum zweiten Hauptsatz, Z. d. VDI, № 5, 1932.

[3] C. Züblin, Der Errenwasserstoffmotor. Die Wärme, № 35, 1934.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Айд Ide 223
Акройд Acroid 274, 286
Аллан Allan 133
Аллен Allen 222
Аллис Allis 155, 228, 331
Альбан Alban 101—103, 240
Амонтон Amonton 313
Ансальдо Ansaldo 357
Анспах Anspach 200
Антошин Н. К. 257
Араго Arago 18, 21, 48, 49, 103, 105, 140, 141
Арбос Arbos 278
Аркрайт Arkwright 46
«Армингтон и Симс» Armington and Sims 223
Архимед Archimedes 19
Аршаулов 308
Аугсбург — Нюрнберг (завод) (MAN) 227, 233, 279, 290—303, 334, 339

Б

Бабкок и Вилькокс Babcock 242, 243, 245, 247, 252, 361—363, 369, 372
Балтийский завод 346
Барбер Barber 258
«Барзанти и Маттеучи» Barsanti 260, 261
Барнаби Barnabi 342
Барт Barth 233
Бауман Baumann 340, 380
Бауэр-Вах Bauer-Wach 345, 347, 356, 400
Бейли Bailey 375
Бейтон Henry Beighton 30, 32
Бекон Bacon 137
Белецкий Г. С. 376
Белидор Belidor 17, 18, 43, 146, 313
Белль Bell 82, 86
Белобродский 203
Бельвилль Belleville 241, 245
Бенсон Benson 362, 364, 366
Бенц Benz 273
Бенье Benier 278
Беринггауз Beringhouse 241
Берд Чарльз 68, 86, 117
Бернулли Bernoulli 80, 81, 186
Бетанкур Betancour 140
Бишоп Bishop 267
Блек Blake 50, 53, 138, 141, 142
Блекстон Blackstone 310
Блекинсоп Blekinsop 125, 126
Блом и Фосс Blohm und Voss 299, 358, 406, 407
Блесс Blaess 322
Блэкет-Гедли Blacket Hedley 126
Блустон Bluston 15
Бодмер Bodmer 146, 169
Божерянов 18
Бойль и Мариотт 141, 192
Боклевский К. П. 305
Болдвин Mattew Baldwin 134
Болтон Bolton 49, 55, 56, 65—70, 84, 87, 96, 106, 122, 125, 143, 295
Больцман Boltzmann 190
Борзиг Borsig 134, 219, 256, 353, 358, 359, 363
Бородин А. П. 253, 257
ф. Боррис v. Borries 214
Брайтон Brighton 267, 270, 271, 285
Брандт А. 19, 26, 68, 86, 105, 110, 116, 120, 136
Бранка 20, 313
Бреда Breda 396
Брикс Ф. А. 171, 173, 256
Бриндлей Brindley 74
Бромлей 163, 274, 252, 309
Броун Бовери (завод) 330—332, 339, 344, 366, 381, 390, 393, 400

Броун Brown, C. 158, 173, 223
Броун Brown, S. 259
Брунтон Brunton 123
Брюнель Brunell 135
Бубнов И. Г. 305
Бульвен Boulvin 98, 161—163, 200
Бурдон Bourdon 101, 105, 113, 239
Бурместер и Вайн Burmester 296, 299, 405, 407
Бурсталл Burstall 128
Бушеро Boucherot 415
Быков Н. А. 156, 228, 306, 319
Бьеррум Bjerrum 375, 410
Бюки Buchi 413
Бюттнер Büttner 322

В

ф. Вальдегг Гейзингер Heusinger v. Waldegg 124, 133, 238
Вальсгаерт Walshaert 133
Вальтер Walther 216
Ватсон (завод) Watson 294
Вебб Webb 214
Вебер Weber 328
Венгам Wenham 235
Вейсс Weiss 240
Верде Verdet 181
Вестингауз Westinghouse 225, 331, 381
Вивиан Vivian 123
Виккерс Vickers (завод) 381
Вилланс Willans 203, 205, 225, 226, 228
де Вилль Арнольд Arnold de Villes 16
Вильсон Wilson 117, 316
Вильямс Williams 131
Вир Weir 240
Владимиров К. А. 283
Вознесенский И. М. 397
Вольф Wolf, R. 235, 236, 347
Вордзель Wordsell 214
Вортингтон Worthington 58, 237, 238, 240
Ворчестер Eduard Sommerset Marquis of Worcester 21, 22, 79
Васбру Wasbraugh 61, 62
Всеволожский В. А. 120
Всеобщая Компания Электричества (завод) 336—340, 381, 384
Вумаг (завод) Wumag 160, 334
Вышнеградский И. А. 202
Вульф Woolf 27, 97—99, 106, 110, 144, 207

Г

Газельвандер Haselwander 309
Гакворт Timothy Hackworth 128, 136
Галлауэр Hallauer 201
Галловей Galloway 18, 104
Галль Hall 209
Ганицкий И. М. 319
Ганкок Hancock 123
Гарбе Garbe 220, 247, 252, 363
Гаргривс I. Hargreaves 286
Гарден М. М. Harden 218
Гаррисон Harrison 136
де-Гаре Бласко Blasco de Gare 20, 75
Гартман Hartmann 352
Гасвель Hasewell 146
Гаскойн 68, 117
Гатцук А. Д. 249, 252
Гашетт Hachette 18, 61
Гей-Люссак Gay Lussac 27, 139, 141, 184, 192
Гейнрих Heinrich 200
Геккер 411
Гельмгольц Helmholtz 180, 181, 183, 185, 186
ван-Гельмонт Van Helmont 139
Геншель Henschel 219, 256, 359
Герике Отто Otto v. Guericke 17, 23
Герлицкий завод 160, 230
Герон Hero 20
Геслоп Heslop 43
Гесс Hess 179
Герцфельд Herzfeld 411
Гефнер Höffner 162
Гик-Гаргривс Hick-Hargreaves 156, 157, 251, 286, 296
Гилль Hill 25
Гирн Г. А. G. A. Hirn 8, 158, 194, 195, 200—207, 216
Гирш Hirsch 282, 296
Гитон Heaton 146
Гиттис В. Ю. 409
де-Глен de Glen 214
Гове Howe 131
Гогг Hogg 151
Гольборн Holborn 410
Гок Hock 272, 273
Гололобов М. В. 257
Гольцман Holtzmann 185
Гольцварт Holzwarth 394
Гордон Gordon 123
Горнблауер Hornblauer 32, 96—98

Горнсби Hornsby 115, 274, 309
Гослом и Теттель 375
Готтингер Hottinger 234
Готфейль Hautefeuille 23, 258
Грасгоф Grashof 202, 281
Грассманн Grassmann 173, 233
Гребер Groeber 375, 411
Гречанинов А. В. 256
Грин Green 248
Гриневецкий В. И. 144, 201, 234, 250, 252, 256, 274, 283, 376, 411
Грове Growe 185
Грюблер Grübler 322
Гуггенбергер Huggenberger 377
Гугон Hugon 262, 265
Гук Hooke 29
Гулль Джонатан J. Hull 80
Гульт Hult 314
Гумилевский Л. 284, 286, 304
Гурауэр Guhrauer 169
Гурней Gurney 123
Гуч Gooch 133
Гэмфри Humphrey 113, 209
Гюберт Hubert 281, 296
Гюйгенс 23, 137, 258

Д

Даймлер Daimler 273, 408
Дальтон Dalton 140
Дарнинг Darning 116
Двельсгауверс Дери Dvelshouwers Dery 202—204
Дезагюлье Desaguliers 27, 139
Делафон Delafond 154, 204
Делен Daelen 116
Дель-Пропосто 306
Делоне Delaunay 227
Делоншан Delonchant 315, 316
Делорм Delorme 20
Депп Г. Ф. 243, 252, 296, 304
Дерби Авраам Derby A. 47
Дерфель Doerfel 162, 170, 219
Дешан Deschamps 296
Джемс James 123
Дженераль Электрик (завод) General Electric Comp. 334—339, 381
Джой Joy 171
Джоуль Joule 180, 181, 183—188, 194, 196
Дизель Diesel 9, 43, 230, 274, 284—304, 311, 404, 410, 413
Дикинсон Dickinson 42, 52, 55, 57, 61, 69, 70
Добль Doble 359, 368
Додд Додлей Dodd Dodley 15, 47
Донкин Donkin 203, 204, 261, 271
Довсон Dowson 277
Дункерлей Dunkerley 322
Дюжарден Dujardin 227
Дюлонг Dulong 141
Дюшен Duchesne 203
Дьяков Д. Н. 275

Е

Ераков 257
Ершов 116, 117, 136

Ж

Жакме Jacquemet 319
Жинаба Ginabat 390
Жирар Girard 317
Жирицкий Г. С. 160, 165, 169, 173, 233, 359, 397
Жиффар Jiffard 136, 194, 237, 239
Жонваль Jonval 315
Жуффруа Jouffroy 81

З

Зейлигер 310
Зейнлейн Söhnlein 286
Зернов Д. С. 274, 283
Зульцер Sulzer 157—161, 173, 207, 223, 228, 230, 232, 234, 297, 301, 367, 407

И

Ивон-Виллерсо Yvon Willerceau 147
Иогансен Johanssen 401
Ишервуд Ysherwood 8, 200, 201, 204, 205 215, 216

К

Каве Cavè 96, 114
Каллендар и Никольсон Callendar and Nicholson 201
Кайль Cail 134
Капитэн Е. Capitaine 286, 302
Кардан Cardan 90
Карельс (завод) Carels 161, 299, 303
Карно Sadi Carnot 107, 145, 176—180, 186—188, 195, 199, 204, 255, 285, 287, 289, 416
Карташев 173, 256
Картмазов 39
Картрайт Cartright 93, 391
Кельвин Kelvin 186, 188
Келер Köhler 285, 289
Кемпелен 313

Кеннеди Kennedy 211, 212, 282, 325
Кертинг Körting 239, 271, 309, 408 280
ван-ден-Керхове (завод) Van den Kerhowe 165, 166, 201, 222, 228
Кириллов И. И. 397
Кирк Alexandre Kirk 212
Кирпичев В. Л. 155, 175, 193, 202, 221, 233, 249
Кирпичев М. В. 248, 249, 376
Кирш Kirsch 203, 205
Кирш К. В. 249
Клапейрон Clapeyron 131, 178, 186, 188, 193
Кларк Clark 120, 126, 135, 200, 201
Классон Р. Э. 337
Клаузиус 178, 186, 188, 190, 191, 193, 195, 197, 198
Клейн, Шанцлин и Беккер Klein, Schanzlin und Becker (завод) 240
Клеман и Дезарм Clement et Desarme 45
Клейтон и Шюттльворт Clayton and Shuttleworth 115
Клемперер Klemperer 200
Клерк Clerk 258, 270, 282, 410
Клименко Л. В. 411, 412
Клингенберг Klingenberg 378
Клод Claude 415, 416
Клуг Klug 171
Кноке Knoke 261
Кнош 157, 251
де-Ко Исаак I. de Caus 21
де-Ко Соломон S. de Caus 20—22, 138
Ковалевский В. И. 249
Ковальский 371
Коккериль Cockerill 109, 110, 117, 280, 292, 319
Кольбер Colbert 46
Кольдинг Colding 180, 185
Кольман Colmann 162—165
Коломенский завод 211, 279, 308
Конди Condie 114
Корейво 311
Кориолис Coriolis 146, 174—176, 185
Корлисс Corliss 8, 92, 151—157, 159, 173, 204, 221, 228
Корт Генри Henry Cort 47, 112
Косицкий А. 285
Коули Cowley 29
Краддок Craddock 214
Крамптон Crampton 46, 135
Креглевский Kreglewski 411
Крениг Krönig 186
Кристи Christie 387, 392
Кросслей Crossley 273
Крупп (завод) Krupp 246, 290, 295, 406
Курбатов 256
Кухенбеккер Kuchenbecker 160
Куш Couche 147
Кей John Key 45
Кэрд Caird 208, 209
Кэри Cairey 353
Кэртис Curtis 330, 332, 334—336, 344, 395
Кюньо Cugnot 121, 122

Л

Лабзин Н. Ф. 116, 118, 119, 136, 144, 249
Лаваль de Laval 317—322, 334, 336, 347, 399
Лавуазье Lavoisier 139
Лагранж Lagrange 175
Лазарев П. П. 181
Ла-Монт La Mont 362, 366, 368
Ланген Langen 259, 265, 267
Ланц Lanz 234—236
Лебон Ph. Lebon 259
Левенсон 222
Левзин 41
Лелутр Leloutre 201
Ленин В. И. 249
Ленц Lentz 166, 167, 352, 359
Ленуар Lenoir 261—265, 268, 281
Леонард (завод) Leonard 134
Леруа Leroy 316
Лесснер (завод) 250, 252, 314
Леупольд Leupold 14, 16, 18, 32, 33, 43, 121, 313
Леффлер Löffler 355, 356, 362, 364—366
Лешателье Le Chatelier 136, 147, 282
Ливингстон Livingston 82—84
Линдгольмен Lindholmen 401
Линде С. Linde 286, 287, 290
Липгарт (завод) 274
Лист Т. (завод) 274
Литценмайер Litzenmayer 308, 309
Ломоносов М. В. 138
Ломоносов Ю. В. 253, 257
Лорд Lord 55, 65, 67
Лорентц Г. А. Н. А. Lorentz 322
Лорен Lorenz 212
Лоренццен Lorenzen 393
Луганский завод 372
Лугинин В. Ф. 193

Луц Luz 95
Людерс Lüders 284

М

Майер P. R. Mayer 180—183, 185
Макарьев Т. Ф. 370, 379
Мак Найт Mac Night 99
Маковский В. М. 314, 393
Маллар и Лешателье Mallard et Lechatelier 282
Маллет Mallet 214, 254, 142
Мальцевского товарищества (завод) 274
Манури д'Экто Manoury d'Ectot 238
Маринони Marinoni 261
Маркс К. 7, 264
Мартенс Л. К. 300
Маршалль Marshall 171
Матчос Matschoss 19, 52, 55, 67, 69, 80, 99, 102, 121, 131, 166, 172, 235, 240, 314
Мах Mach 143, 181, 184
Меджер 120
Мейер Е. Е. Meyer 280, 282
Мейер J. Meyer 71, 152, 169, 180, 182—188, 218
Мейер П. Meyer 285
Мельмс и Пфеннингер Melms und Pfenninger 331
Менье Walther Meunier 216
Металлический завод 340, 346, 372, 373, 401
Миллион Million 268
Монгольфьер Mongolfier 180
Монд Mond 278
Моншейль Jean de Montcheuil 219
Мор Mohr 179
Морен Morin 144
Морланд Morland 22
Моудсли Maudsley 82, 94, 95
Мюрхид Muirhead 18
Мурдок Murdock 37, 88, 93, 106, 122
Муррей Murrey 55, 88, 146
Мюллер Müller 155, 156, 172, 173, 237, 240
Мюнцингер Münzinger 248, 249, 362—365, 368—370, 376

Н

Навье Navier 17, 146, 174, 176
Надаль Nadal 200
Надежин А. А. 376
Наумов В. С. 280, 281, 310, 404
Невский завод 171
Нельсон Neilson 313, 314, 317—319
Николаевский судостроительный завод 346
Нобель Э. (завод) 118, 261, 274, 296, 298, 303—306, 407
Нордман Nordmann 356
Нольтейн Е. Е. 254, 257
Норрис Norris 134
Нуссельт Nusselt 375, 411
Ньель Niel 273
Ньепс Niepce 259, 285
Ньюкомен Newcomen 5, 29—33, 38—40, 48, 56, 78
Ньютон Newton 138
Нэгель Nägel 203, 233, 411
Нэпир Napier 212
Нэсмит Nasmyth 113, 114

О

Огль Ogle 123
Оксирон Auxiron 81
Оньэнс П. Onians 47
Ортвейн и Карасинский (завод) 250, 261
О'Рурк А. Н. 126, 136
Отто Otto 260, 265—270, 285, 287
Отто-Дейтц (завод) Otto-Deutz 273, 277, 280, 291, 292, 295

П

Павликовский 413
Памбур de Pambour 39, 145, 198
Папин Papin 17, 22—25, 28—30, 38, 43, 59, 72, 79, 80, 105, 107, 121, 138, 139, 258, 294, 295
Паренти Parenti 322
Парсонс А. Parsons 316, 318, 319, 323—328, 330, 339, 341—347, 382—384
Паскаль Pascal 17, 23
Пенн Penn 92, 215
Пельтон Pellton 238, 336
Перкинс Perkins 101—103, 215
Перри Perry 201
Перриго Perrigo 317
Перье Perier 81, 96
Петелин Г. И. 386
Петров Н. П. 257
Петров П. А. 375
Петров В. А. 411
Пидбёф Piedboef 241
Пикар Pickard 61, 62

Пиль Peel 130, 315
Пир Pier 375, 410
Планк М. М. Planck 176, 181, 191
Поле Р. (завод) 250, 252, 274
Ползунов 40—44, 109, 139
Понселе Poncelet 141—145, 174, 315
делла Порта della Porta 21, 22
Портер Porter 222, 223
Прандтль Prandtl 322
Прелль Pröll 224
Пристлей Priestley 139
Пристман Priestman 273, 275
Прони Prony 18, 27, 48, 60, 61, 140, 176
Путиловский завод 171

Р

Радованович Radovanoviç 162, 163
Радциг А. А. 50, 145, 176, 200, 201, 218, 233, 339, 396, 404, 407
Радциг В. А. 390
Раевский А. С. 257
Райт Wright 260
Рамелли Ramelli 21
Рамзин Л. К. 373
Рансом и Симс (завод) 115
Ратенау Rathenau 335
Рато Rateau 296, 317, 325, 332—334, 336, 339, 341, 393
Реаль Real 315
Редкин 195
Редтенбахер Redtenbacher 147, 196
Рейнольдс О. Reynolds 375
Рейнольдс Р. Reynolds 47, 155, 157
Рейтлингер Reutlinger 234
Рейтман Reithmann 262, 268
Рело Reulaux 263, 264, 289
Ренекин Солем Renequin Solem 16
Ренкин Rankin 143, 186, 193, 196—198, 204, 207, 280, 318
Рентген Röntgen 120, 209, 210, 214
Реньо Regnault 192—194
Ренфордт Renfordt 397
Риглей Rigley 38
Рид Read 122
Ридер Rider 169—171, 219, 226, 228
Ридлер Riedler 153—155, 284
Ридлер-Штумпф 336, 337
Ринггофер Ringhofer 163
Рихман, Георг Вильгельм 138, 174
Рихтер Richter 411
Рише Riché 279
Робизон Robison 55, 121, 146
Романов 126, 257
Рот 382
Рубинштейн 386
Рузевельт Roosevelt 82
Румзей Rumsey 81
Рустон Ruston 157, 224, 273
Рут Root 242
Рутс Roots 333

С

Садлер James Sadler 98, 314
Саймон Simon 271, 285
Сэвери Thomas Savery 17, 22—30, 37, 39, 71, 72, 238, 294
Сеген Seguin 129, 180
Сесиль Cecil 259
Сикельс Sickels 151
Сильницкий 370
Сименс В. Siemens 196, 197, 215, 223, 271, 276, 285
Сименс-Шуккерт (завод) 381, 385
Симингтон Symington 82, 385
Синеуцкий 409—411
Слаби Slaby 195, 265, 282
Смайльс Smiles 6, 15, 47, 49, 59, 113, 126
Смирнов С. А. 257
Смит Smith 82, 208
Смитон Smeaton 34—38, 59, 70, 71, 77, 109, 114
Сонгин П. 251
Сормовский завод 309
Сосновский Sosnowski 314, 315, 317, 319
Соттер Гарле (завод) S. Harle 298, 332
Соутерн Southern 140
Спенсер Spencer 157, 209
Сталин И. В. 264
Стевенс Stevens 82, 85, 103
Стертевант Stertevant 15
Стефан-Больцман 375
Стефенсон Г. Stephenson, G. 126—133, 171
Стефенсон Р. Stephenson, R. 136
Стирлинг Stirling, Robert and James 178, 196, 247, 361
Стодола А. Stodola, A. 223, 228, 319, 322, 335, 337, 344, 346, 367, 383, 393
Стрит Street 258
Стьюарт Stewart 18
Суммерс Summers 120

Т

Танги (завод) Tangye 226, 261
Твайт Twight 280
Тиме И. 201
Тимошенко С. П. 397, 412
Тиссен Редер Tissen Röder 331
Тодд Todd 232
Този (завод) Tosi 161, 331
Томсон В. Thomson 178, 184, 188, 191, 193
Торичелли Torricelli 17, 23
Торникрофт Thornikroft 245, 246, 342
Тревитик Trevithick, R. 74, 75, 97, 101, 103, 106, 107, 109, 122, 124, 125, 128—130
Тредгольд Tredgold 18, 39, 60, 65, 90, 98, 107, 126, 140, 144, 146
дю Трембле Du Tremblay 199, 415
Треска Tresca 262, 263, 282
Трик Trick 92, 135
Тринклер 308—310, 404
Турнер Turner 316, 317
Тэрстон Thurston, R. 19, 82, 101, 121, 202

У

Уайат Whyatt 46
Уатт Д. James Watt 15, 39, 43, 48—67, 84—87, 96, 98, 99, 106, 120—122, 125, 126, 130, 139, 140, 143, 144, 146, 147, 152, 154, 204, 222, 293, 312—314
Уайненс 46, 136
Уилок Wheelock 157
Унвин Unwin 275, 282
Урванцев Н. М. 412
Уотерстон Waterston 187

Ф

Фальтин Faltin 397
Фарадей Michael Faraday 177
Фарко Farcot 91, 152, 156, 157, 168, 169, 317
Фельзер (завод) 250
Фенеон Fénéon 315
Феппль Föppl 411, 322
Филиппов Д. Д. 305
Фитч Fitch 81
Фицнер и Гампер (завод) 252
Флигнер Fliegner 322
Флюгель Flügel 382, 383, 400
Форд Ричард Ford, R. 47
Форкауф Vorkauf 368
Форнер Forner 397
Франко-Русский завод 346
Френкель Я. И. 191
Фрикар Fricart 157
Фультон Fulton 82—85
Фурнейрон Fourneyron 315
Фурье Fourier, G. 174
Фэрэ Faray 18

Х

Худяков П. К. 106, 237, 238, 249, 251

Ц

Цанка Zanca 21
Царлатти Zarlatti 357
Цейнер Zeuner, G. 147, 172, 173, 189, 193—197, 202, 216, 239, 281, 290, 319, 322
Целли Zoelly 325, 334, 368, 383
Церковиц Zerkowitz 396
Циглер Ziegler 139

Ч

Чальмерс (завод) Chalmers 157, 228, 331
Чапман Chapmann 323
Чевертон Chaverton 260
Черепанов 136
Черницын 41
Чирков А. А. 356

Ш

Шверер Schwoerer 216
Шеель Scheel 410
Шепелевы бр. (завод) 117
Шершнев 371
Шиле Schile 318
Шиповы (завод) 117
Шлаттер 32, 41, 138
Шлик Schlick 212
Шмидт В. Schmidt, W. 103, 140, 217—220, 352, 353, 362—365, 378
Шмидт Г. Schmidt, G. 281
Шнейдер (завод) 110, 113, 114, 134, 214, 234
Шпиль Spiel 273
Шретер В. Н. 376
Шретер М. Schroeter, M. 166, 203, 217, 282, 284, 286, 292, 293
Штаубер Stauber 396
Штумпф Stumpf 231—233, 254, 336, 352, 358

Шульц Schulz 246
Шюле B. Schüle, W. 197, 375, 384, 394, 395

Щ

Щукин Н. А. 257

Э

Эберле Eberle 233, 240, 264
Эванс О. Evans Oliver 67, 74, 75, 82, 97, 99—101, 122, 146, 151, 221, 258
Эггельс Eggels 95
Энгельс Engels F. 186, 264, 282
Эдвардс Edwards 99, 117, 317
Эйхельберг Eichelberg 411
Экваль (завод) 275
Эльдер Elder John 210
Эмден Emden Paul 322
Эмери Emery 210, 211
Эммет Emmet 391, 393, 394
Эйерман Eyermann 317
Эрикссон Ericsson 128, 195, 196, 208, 209
Эрликон (завод) Oerlicon 334, 381

Ю

Южаков М. Н. 44, 45
Юинг Ewing 203, 205, 221, 325, 342
Юнгстрем Ljungström 340, 346, 356, 370
Юнкерс Junkers 271, 308, 310, 311, 357, 405, 410

Я

Яковлев Д. В. 200, 201, 333
Якуб 397
Яновский М. И. 345, 397
Ярроу Jarrow 245, 246, 352

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие. 5

Первый период

ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ В XVII И XVIII СТОЛЕТИЯХ

Глава I

Производственные и технические проблемы в XVII и начале XVIII столетий

Текстильная промышленность в Англии в XVII веке. 13
Железоделательная и каменноугольная промышленность. 14
Гидравлические сооружения. 16

Глава II

Применение пара в XVII столетии

Сведения о самых ранних попытках использования силы пара. 18
Папин и Сэвери. 22

Глава III

Атмосферная машина

Атмосферная машина Ньюкомена. 29
Атмосферные машины Смитона. 34
Расход пара и использование тепла в атмосферных машинах Смитона. . . . 37
Позднейшие видоизменения и усовершенствования атмосферных машин. . . . 38
Атмосферная машина в России. Машина Ползунова. 40

Глава IV

Уатт и усовершенствования, внесенные им в паровую машину

Промышленный переворот XVIII столетия в Англии. 45
Железоделательная и каменноугольная промышленность в Англии в XVIII столетии. 47
Джемс Уатт. Его жизнь. Начало занятий паровой машиной. 48
Осуществление машины простого действия по патенту 1769 года 55
Позднейшие патенты Уатта. Машина двойного действия с непрерывным вращением. 58
Распространение машин Уатта. Дальнейшие усовершенствования в них, сделанные Уаттом. 65

Стр.

Организация производства паровых машин на заводе Болтона и Уатта. Испытание установленных машин Уатта и использование в них тепла. . . . 69
Паровые котлы атмосферных машин, машин Уатта и его современников. . . . 72

Второй период
ТЕПЛОТЕХНИКА В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX СТОЛЕТИЯ

Глава I
Первые пароходные машины

Ранние попытки создания парохода. 79
Создание парохода в начале XIX века 80
Распространение пароходных машин и их первые усовершенствования. . . . 85

Глава II
Развитие стационарной паровой машины в первой половине XIX столетия

Конструктивные усовершенствования машины Уатта. 87
Машины прямого действия. 92
Первые машины высокого давления 96
Попытки применения особенно высокого давления 101
Паровые котлы для машин более высокого давления. 103
Типы паровых машин специального назначения. 105
Паровая машина в России в первой половине XIX века. 116

Глава III
Создание паровоза

Паровые повозки на обыкновенных дорогах. 121
Первые локомотивы для передвижения по рельсам. 124
Создание паровоза Георгом Стефенсоном. 126
Дальнейшие усовершенствования паровоза. 131

Глава IV
Развитие теории паровой машины в первой половине XIX столетия

Значение физического представления о теплоте в создании паровой машины. 137
Опытное исследование свойств водяного пара в XVIII веке и первой половине XIX века. 139
Определение работы пара в паровой машине. 142
Проблемы динамики и вопросы прочности в паровых машинах. 145

Третий период
ТЕПЛОТЕХНИКА ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XIX И В НАЧАЛЕ XX СТОЛЕТИЙ

Глава I
Создание усовершенствованных парораспределений и теория парораспределений

Машина Корлисса. 151
Клапанные парораспределения. 157
Развитие золотниковых парораспределений и их теоретическое исследование. 167

Глава II

Создание термодинамики и термодинамической теории паровой машины

Стр.

Теория тепла и прикладная механика в первой трети XIX века 174
Создание термодинамики: предшественники 178
Открытие закона сохранения энергии 180
Создание второго закона термодинамики. 187
Исследование свойств водяного пара. 192
Термодинамика двигателей, работающих нагретым воздухом. 195
Термодинамическая теория паровой машины 197
Экспериментальное изучение паровой машины. 200

Глава III

Усовершенствования паровой машины в последней трети XIX и начале XX столетий

Паровые машины многократного расширения. Применение их в судовых устройствах 207
Применение перегретого пара в паровых машинах. 215
Паровые машины для электрических станций 220
Последние довоенные улучшения паровой машины; паровые машины с использованием отходящего тепла, прямоточные паровые машины. . . 230
Локомобили 234
Паровые машины специального назначения. 236
Развитие паровых котлов во второй половине XIX столетия и в начале XX столетия. 240
Паровые машины и паровые котлы в России во второй половине XIX столетия и в начале XX столетия 249

Глава IV

Возникновение и первый период развития двигателей внутреннего сгорания

Первые попытки создания двигателей внутреннего сгорания. 258
Машина Ленуара 260
Атмосферная машина Отто-Лангена. 265
Четырехтактный двигатель Отто 267
Различные процессы, предлагавшиеся в двигателях внутреннего сгорания . 270
Применение жидкого топлива и специальных газов в двигателях внутреннего сгорания. 272
Развитие теории газовых двигателей 281

Глава V

Создание и довоенное развитие дизельмотора

Предшественники Дизеля. 284
Создание первого двигателя Дизеля 286
Конструктивное осуществление двигателя 293
Развитие дизелестроения в Европе и Америке в довоенном периоде. 296

Стр.

Возникновение и развитие дизелестроения в России в дореволюционном периоде 303
Видоизменения дизельмотора; двигатели Газельвандера, Литценмайера, Тринклера, Бронса, Сабата, Юнкерса 308

Глава VI

Возникновение и первые периоды развития паровой турбины (до конца мировой войны)

Ранняя история паровой турбины 312
Турбина Лаваля 319
Турбина Парсонса 323
Активные многоступенчатые турбины 332
Характеристика стационарного паротурбостроения к моменту начала мировой войны и в первые годы после войны 338
Судовые турбины 341

Четвертый период

ТЕПЛОТЕХНИКА ПОСЛЕВОЕННОГО ВРЕМЕНИ

Глава I

Послевоенные паровые машины

Характеристика постройки и применения паровых машин в разных областях в послевоенном периоде 351

Глава II

Паровые котлы послевоенного времени

Мощность и типы современных котлов 361
Особые типы котлов 364
Применение угольной пыли 368
Котлостроение в СССР 371
Научно-исследовательская работа в области котлостроения 374

Глава III

Послевоенное развитие паровых турбин

Применение высоких давлений и перегрева 378
Мощность и типы современных турбин 381
Способы улучшения термодинамического процесса; промежуточный перегрев и подогрев питательной воды 385
Соединение силового устройства с тепловым 387
Материалы для турбостроения 388
Конденсационные установки 390
Паровые турбины, работающие двумя жидкостями 391
Газовая турбина 393
Научно-исследовательская работа в области паровых турбин 396
Судовые турбины 399
Паротурбостроение в СССР 401

Стр.

Глава IV

Послевоенное дизелестроение

Бескомпрессорные и крупные дизельмоторы 404
Легкие быстроходные дизельмоторы 408
Научно-исследовательская работа в области двигателей внутреннего сгорания. 410
Особые технические проблемы дизелестроения 412

Глава V

Новые предложения

Бинарные циклы. Предложения Клода и Бушеро, Баржо и других 415
Именной указатель 418

2007333369